



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ ROTOROVÝCH MATERIÁLŮ

WELDING OF TURBINE ROTOR MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Marek PALÁN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav DANĚK, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Palán

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Svařování rotorových materiálů

v anglickém jazyce:

Welding of turbine rotor materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor svařitelnosti vybraných materiálů pro svařované turbínové rotory. Experimentální ověření.

Cíle bakalářské práce:

Zhodnocení navržené technologie svařování: hodnocení makro a mikrostruktury spoje, průběhu tvrdosti jednotlivých pásů TOO a svarového kovu.

Seznam odborné literatury:

AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov. Bratislava. ETERNA PRESS 2003. 202s. ISBN 80-968359-5-5

FOLDYNA Václav a kol. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3

MESSLER, R. W. Jr.. Principles of Welding. New York, USA. 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

Příručka pro svařování pod tavidlem. ESAB Vamberk, spol. s r.o. 2009. 94 s.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

PALÁN Marek: Svařování rotorových materiálů.

Práce se zabývá základní problematikou svařování rotorových materiálů. Popisuje podstatu svařování a způsoby detekce vad vzniklých svařováním. Dále je podrobněji rozebrán vznik heterogenních svarových spojů a vliv jednotlivých prvků ve svaru na vlastnosti výsledného svarového spoje. Je zde uvedeno podrobné rozdělení žárupevných ocelí a principy jejich žárupevnosti. Práce obsahuje přehled metod svařování, které se používají při svařování rotorových materiálů a jednotlivé metody jsou podrobněji popsány. Součástí práce je i uvedení teplotních procesů při svařování. V experimentální části je zhodnocena makrostruktura, tvrdost, vliv přehřevu a použitá metoda při provedení návaru na materiál 26NiCrMoV14-5.

Klíčová slova

heterogenní svar, rotor, svařitelnost, svařování, žárupevná ocel

ABSTRACT

PALÁN Marek: Welding of turbine rotor materials.

This thesis deal with the basic problems of welding rotor materials. It describe the essence of welding and ways of detecting defects caused by welding. Furthermore, it is covered in more detail the formation of heterogeneous welds and the impact of individual elements in the weld on the properties of the resulting weld. It lists detailed breakdown of creep-resistant steels and principles of their heat resistance. The thesis gives an overview of welding used in welding rotor materials and various methods are described. The work also includes commissioning of thermal processes in welding. In the experimental part is evaluated macrostructure, hardness and the method used in the implementation of the cladding material 26NiCrMoV14-5.

Key words

heat resisting steel, heterogeneous weld, rotor, weldability, welding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PALÁN, Marek. *Svařování rotorových materiálů*. Brno, 2014. 42s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Svařování rotorových materiálů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Marek Palán

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Prohlášení

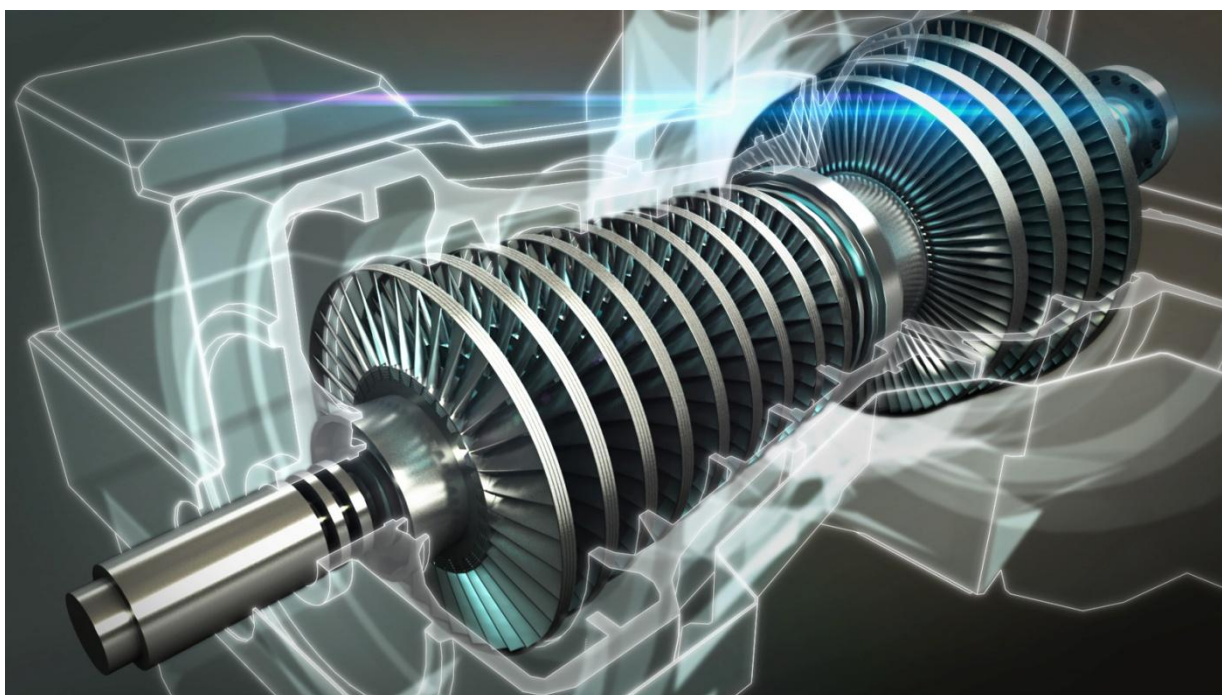
Poděkování

Obsah

Úvod	8
1 Technologie svařování	9
1.1 Svarový spoj	9
1.2 Uplatnění svařování	10
1.3 Metody svařování	10
2 Tepelné zpracování svarových spojů	11
3 Teplotní procesy ve svařování	13
4 Zkoušení svarových spojů a jejich vady	15
4.1 Vady svarových spojů	15
4.2 Zkoušení svarových spojů	16
5 Turbíny	18
6 Rotorové materiály	20
6.1 Žárupevnost	20
6.2 Creep	20
6.3 Typy žárupevných ocelí	21
7 Požadavky na materiál a svarové spoje u turbín	23
7.1 Legury a jejich ovlivňování vlastností materiálu a vliv na svařitelnost	23
7.2 Mechanické vlastnosti svarových spojů žárupevných ocelí	25
8 Heterogenní svarový spoj	27
9 Metody svařování žárupevných materiálů	30
10 Experimentální ověření	35
10.1 Návar bez předehřevu	35
10.1.1 Provedení navaření návaru	35
10.1.2 Makrostruktura návaru	37
10.1.3 Průběh tvrdosti v návaru	38
10.1.4 Zhodnocení použité technologie svařování	39
10.2 Návar s předehřevem	39
10.2.1 Stanovení teploty předehřevu	39
10.3 Porovnání výsledků svařování bez předehřevu a s předehřevem	41
Závěr	42
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam použité obrazové dokumentace a tabulek	

ÚVOD [1]; [3]; [16]; [31]

V současnosti je kladen velký důraz na kvalitu a dlouhou životnost konstrukčních součástí, nejenak je tomu i u součástí pro energetický průmysl. Právě v energetice jsou vysoké nároky na zařízení a jejich spolehlivost, především pak na jaderných elektrárnách, kde každá odstávka technologie kvůli technickým problémům s některým ze zařízení stojí mnoho peněz. Mimo jiné může poškozená část způsobit defekty na jiných zařízeních. Jednou z takových částí je rotor turbíny (obr. 1). Při výrobě rotorů víceústupňových parních turbín je s výhodou používáno svařovaných rotorů, neboť jednotlivé stupně jsou vyráběny z materiálů, které mají optimální mechanické vlastnosti pro práci při daných pracovních teplotách. Tyto stupně jsou následně svařovány v jeden celek, rotor. Pro provoz s výše uvedenými užitnými vlastnostmi je důležité vytvoření bezvadného svarového spoje s minimálním ovlivněním okolí svarového spoje. Jelikož se jedná o svařování dvou různorodých materiálů s rozdílnými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi často dochází ke vzniku napětí a následným trhlinám. Tyto nepříznivé důsledky jsou eliminovány volbou vhodných postupů při svařování.



Obr. 1 Model parní turbíny od firmy Alstom Power [1]

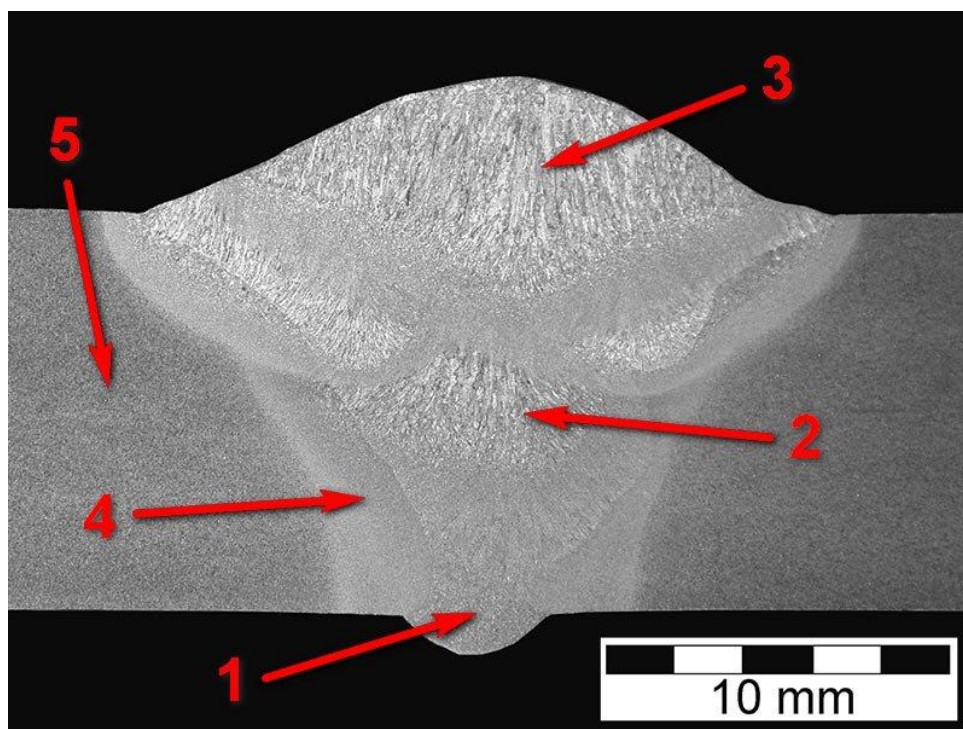
1 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [8]; [13]; [14]; [16]; [17]; [22]

Svařování je proces při němž dochází k vytvoření pevného a trvalého spoje mezi dvěma nebo více dílci. Při tavném svařování dojde k roztavení základního materiálu svařovaných dílců, materiály dílců se následně promíchají, tuhnou a vzniká svar. U většiny typů svarů je nutno přidávat přídavný materiál k vyplnění prostorů, kde materiál chybí. Svařování se používá pro vytvoření trvalých spojů nejen u kovů, ale lze také svařovat plasty.

1.1 Svarový spoj

Trvalý spoj vytvořený svařováním se nazývá svarový spoj (obr.2). Svarový spoj se skládá z několika částí, které jej tvoří.

- základní materiál
- svar
- tepelně ovlivněná oblast



Obr. 2 Svarový spoj: 1 - kořenová vrstva svaru; 2 - výplňová vrstva svaru; 3 - krycí vrstva svaru; 4 - tepelně ovlivněná oblast; 5 - základní materiál [13]

Základní materiál

Základní materiál je materiál, který tvoří svařenec, ale struktura ani vlastnosti daného materiálu nejsou nijak ovlivněny procesem svařování. Použití základního materiálu je omezeno jeho vhodností pro svařování danou metodou.

Svar

Svar je nosná část svarového spoje. Svar vzniká natavením základního materiálu a přídavného materiálu a jeho následným tuhnutím. Svar má dendritickou strukturu a hrubá zrna způsobené rychlým odvodem tepla po dokončení svařování. Prudkému ochlazení, a tedy vzniku martenzitické struktury, lze zabránit vhodným přehřevem.

Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněná oblast je část svaru, která nebyla při svařování natavena, ale její struktura se změnila v důsledku působení tepla vzniklého při svařování. V tepelně ovlivněné oblasti dochází k hrubnutí zrn popřípadě ke vzniku křehkých struktur vlivem rychlého ochlazení. Důsledkem působení těchto změn ve struktuře dochází k negativnímu ovlivnění mechanických vlastností. Tepelně ovlivněná oblast je tak nejnebezpečnější místo ve svarovém spoji, kde dochází nejčastěji k defektům u dobře provedených svarů.

Přídavný materiál

U většiny typů svarů je třeba do svarové lázně přidávat materiál, aby došlo k vyplnění prostoru svaru mezi dvěma dílci. Přídavný materiál by měl mít chemické složení, které se co nejvíce blíží chemickému složení základního materiálu. V některých případech se používá přídavný materiál, který obsahuje zvýšené množství určitých prvků, které slouží k dolegování svarového kovu pro zvýšení mechanických vlastností.

1.2 Uplatnění svařování

Svařování se používá všude tam, kde potřeba vytvoření trvalého spojení dvou materiálů. V dnešní době lze již svařovat řada různorodých materiálů za použití běžných metod, případně speciálními metodami nebo kombinacemi více metod svařování. Největší uplatnění svařování je v průmyslu, především pak v energetice, těžebním průmyslu, strojírenství, atd. Nevýhodou při použití svařování je působení tepla.

1.3 Metody svařování

Vzhledem k rozmanitosti aplikací svařování lze rozlišit několik metod svařování, které jsou vhodné pro danou aplikaci. Faktory rozhodující o volbě metody svařování jsou druh svařovaného materiálu, technologičnost, svařovaný profil, tloušťka materiálu, atd.

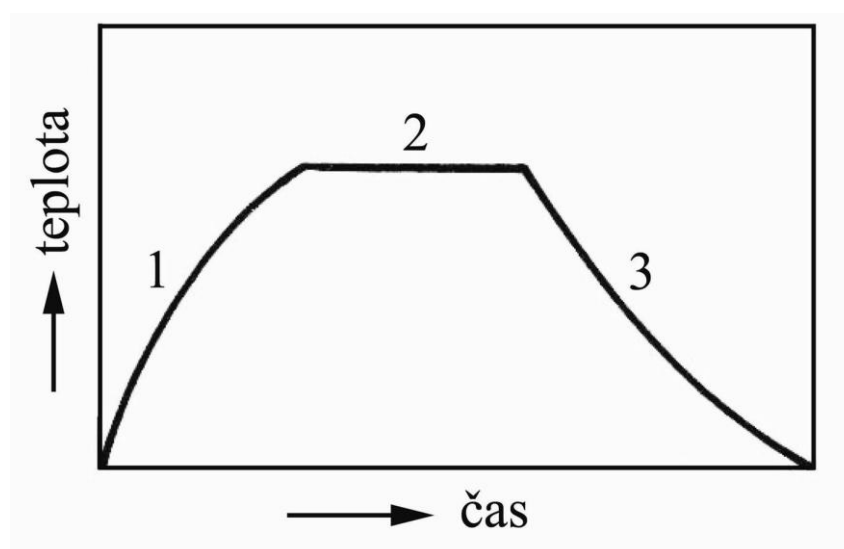
Základní rozdělení svařovacích metod:

- tavné svařování
- tlakové svařování

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ [22]; [24]; [32]

Vlivem svařování dochází ke vzniku nestejnorodé struktury svaru, kde materiál svaru má hrubou lici strukturu oproti materiálu základnímu, který je reprezentován jemnozrnnou strukturou. Díky umístění svarů a jejich nerovnoměrnému chladnutí dochází k vnitřním tahovým napětím. Toto napětí se může projevit vznikem mikrotrhlin, které vznikají, pokud nemá svařenec dostatečnou zásobu plasticity. Nástrojem pro eliminování těchto napětí je vhodné tepelné zpracování (obr. 3). Dalším důvodem provádění tepelného zpracování svarových spojů je zlepšení jejich mechanických vlastností a zlepšení jejich obrobitelnosti, případně houževnatosti. Hlavní důvody provádění tepelného zpracování jsou tyto:

- snížení tepelných napětí ve svařenci
- vyrovnání struktury
- získání požadovaných hodnot mechanických vlastností svaru



Obr. 3 Průběh tepelného zpracování: 1 - ohřev; 2 - výdrž na teplotě; 3 - ochlazování [32]

Způsoby tepelného zpracování

- žihání ke snížení tepelných napětí
- žihání na měkko
- normalizační žihání
- zušlechťování

Žihání ke snížení tepelných napětí

Žihání ke snížení tepelných napětí probíhá tak, že se svařenec ohřeje na teplotu 450 - 650 °C, následuje výdrž na této teplotě s ohledem na tloušťku žíhaného materiálu. Je důležité, aby došlo k rovnoměrnému prohřátí svaru. Poté začne pomalé ochlazování v peci. Během tohoto tepelného zpracování nedochází k fázovým změnám - tepelné zpracování bez překrystalizace.

Žíhání na měkko

Teplota, při které se provádí toto tepelné zpracování, se nachází těsně pod teplotou A_1 , tedy 680 - 700 °C. Po ohřátí na požadovanou teplotu následuje několikahodinová výdrž a poté ochlazování v peci. Dochází k přeměně páskového perlitu na zrnitý, a tím ke zvýšení obrobiteľnosti.

Normalizační žíhání

Při normalizačním žíhání dochází k překrystalizaci, při které se úplně přemění ferit a perlit na austenit. Nejprve dochází k ohřevu na teplotu 30 až 50 °C nad teplotu A_{c3} , následuje výdrž na teplotě a poté ochlazení na vzduchu. Tímto tepelným zpracováním dochází ke vzniku rovnoměrné a jemnozrnné struktury a rovnoměrných mechanických vlastností. Odstraní se tak nestejnorodá struktura.

Zušlechťování

Zušlechťování je ve své podstatě kombinace dvou metod tepelného zpracování, a to kalení a popouštění. Při zušlechťování se materiál ohřeje na teplotu kalení 1000 - 1200 °C, následně se materiál prudce ochladí a přistoupí se k popouštění. Opět se materiál ohřeje, tentokrát na teplotu 650 °C. Poté se materiál pomalu ochlazuje. Tímto tepelným zpracováním se tvoří struktura, která obsahuje tzv. sorbit, který vzniká rozpadem martenzitu. Výsledkem je struktura s vysokou houževnatostí s relativně vysokou mezí pevnosti. Zušlechťování se provádí pouze u ocelí vhodných ke kalení.

3 TEPLOTNÍ PROCESY VE SVAŘOVÁNÍ [10]; [16]; [17]; [22]; [24]; [25]

Teplotní procesy jsou součástí každého svařování. Důsledek tepla vzniklého při svařování může být jak pozitivní, tak negativní. Během svařování probíhají teplotní procesy, které výrazně ovlivňují výslednou strukturu a mechanické vlastnosti.

Vnesené teplo

Jedná se o teplo, které je předáno vlivem svařování do místa svařování. Velikost vneseného tepla závisí na metodě svařování, kterou je svařováno. Každá metoda svařování funguje s určitou účinností přenosu tepla do svaru, což je ve vztahu (vztah 3.1) zohledněno koeficientem účinnosti. Dalšími parametry ovlivňující vnesené teplo jsou rychlost svařování, svařovací proud a napětí.

Vnesené teplo lze spočítat podle vztahu (3.1).

$$Q = \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} \cdot \eta \quad (3.1)$$

kde: Q [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$] - vnesené teplo,

U [V] - svařovací napětí,

I [A] - svařovací proud,

v [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] - rychlost svařování,

η [-] - koeficient účinnosti přenosu tepla při dané technologii svařování.

Tepelný příkon

Každá metoda svařování má díky rozdílné fyzikální podstatě i rozdílnou velikost tepelného příkonu (obr. 4). Z tohoto důvodu je nutné zvolit pro daný svařovaný materiál, vhodnou metodu, která odpovídá požadavkům na nejlepší získané vlastnosti po provedení svařování. Mimo jiné se zohledňuje i tloušťka svařovaného materiálu.



Obr. 4 Tepelný příkon u různých svařovacích metod [10]

Teplotní cyklus

Teplotním cyklem se rozumí průběh teplot v jednom místě svarového spoje. V tomto místě jsou v závislosti na čase zaznamenávány teploty. Vynesením toho průběhu do grafu vznikají charakteristiky, které jsou typické pro každý způsob svařování. Tato charakteristika se může měnit například při svařování vícevrstvých svarů. Teplotní cyklus má vliv na tvrdost, pevnost a zbytkové napětí.

Teplota předehřevu

Předehřev je prováděn, kvůli snížení rychlosti ochlazování. Snížením rychlosti ochlazování se eliminuje náchylnost k tvorbě tvrdé a křehké struktury, jejímž vznikem dojde ke zvýšení náchylnosti ke vzniku defektů. Dále slouží přehřev ke snížení množství difúzního vodíku. Teplota předehřevu se standardně pohybuje v rozmezí teplot od 50 °C do 350 °C. Ve výjimečných případech může být teplo předehřevu vyšší. Určení teploty předehřevu závisí na několika faktorech, jako je tloušťka svařovaného materiálu a chemické složení materiálu, atd. Teplota předehřevu lze stanovit různými výpočtovými či experimentálně ověřenými metodami. Stanovení teploty předehřevu upravuje norma ČSN EN 1011-2. Předehřev lze provádět několika způsoby, především pak indukčně, odporově či plynovým hořákem.

Teplota interpass

Teplotou interpass se rozumí teplota, kterou má materiál předchozí housenky těsně před kladením další housenky u vícevrstvého svařování. Svařování následující housenky v případě, že teplota předcházející housenky je vyšší než teplota interpass, může mít nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti. Při svařování feritických ocelí je tato hodnota prakticky shodná s teplotou předehřevu. S rostoucí teplotou interpass dochází k poklesu meze kluzu i meze pevnosti.

4 ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ A JEJICH VADY [8]; [20]; [22]; [24]; [30]

4.1 Vady svarových spojů

Pojmem vada svarového spoje se rozumí každá odchylka tvaru, rozměrů, vzhledu, struktury a mechanických či fyzikálních vlastností. Vady ve svarech mohou vzniknout při metalurgickém procesu. Další možnosti vzniku vad ve svarech je při tepelném zpracování svarů a v neposlední řadě při provozním zatížení, ať už mechanickém či chemickém.

Vady u svarových spojů zhotovených tavným svařováním se hodnotí podle požadovaných stupňů kvality. Jednotlivé stupně kvality a kritéria jejich přípustnosti jsou popsány v normě ČSN EN ISO 5817 z roku 2008. Pracovník provádějící nedestruktivní zkoušení musí být držitelem platného certifikátu podle normy ČSN EN ISO 9712 z roku 2013, který jej opravňuje k provádění zkoušky.

Rozdělení vad svarových spojů podle jejich způsobu hodnocení

Podle způsobu hodnocení vad se dělí na:

- nominální hodnocení
- metrické hodnocení

Nominální hodnocení

Nominální hodnocení je založeno na principu přítomnosti vady. Pokud dojde k výskytu dané vady u zkoušeného svaru, jedná se o důvod k jeho vyloučení a označení jako nevyhovující. Následně dojde k opravě a odstranění vady nebo je odlitek vyřazen jako zmetek. K nominálnímu hodnocení vad se přistupuje u vad kritických, které zásadně ovlivňují celistvost či pevnost odlitku, jako je například přítomnost trhliny.

Metrické hodnocení

Toto hodnocení se zakládá na přípustných rozměrech daných vad. V normě je určeno maximální přípustná velikost vady a jejich množství na referenční ploše a pokud dojde k překročení některého z parametrů je nutné vadu eliminovat, odstranit, popřípadě celý odlitek vyřadit jako zmetek. Jedná se o nečastější způsob hodnocení vad.

Rozdělení vad svarových spojů podle jejich tvaru

- plošné vady
- objemové vady

Plošné vady

Plošná vada je taková vada, u které je rozměr v jednom ze směrů mnohem menší než v ostatních směrech. Plošné vady bývají obvykle iniciátory trhlin v materiálu a mohou vést až k defektu.

Objemové vady

Objemovou vadu lze definovat jako prostorovou vadu, u které jsou rozměry ve všech směrech srovnatelné. Jedná se z pohledu únavového namáhání o méně nebezpečné vady, jelikož u nich není koncentrováno napětí, které by mohlo vyvolat vznik defektů.

Rozdělení vad svarových spojů podle jejich charakteru

- trhliny
- dutiny
- pevné vměstky
- studené spoje a neprůvary
- vady tvaru a rozměru
- jiné vady

4.2 Zkoušení svarových spojů

Zkoušení svarových spojů je důležité s ohledem na zachování požadované funkce a vlastnosti svarového spoje. Podle způsobu detekce vad a jeho vztahu k celistvosti svaru se dělí zkoušení na:

- nedestruktivní zkoušení
- destruktivní zkoušení

Nedestruktivní zkoušení

Nedestruktivní zkoušení je takové zkoušení při němž se detekují vady, avšak nedochází k porušení zkušebního předmětu či finálního výrobku. Nedestruktivní zkoušení lze použít jak při navrhování technologie svařování a ověřování její vhodnosti aplikace na daný materiál, tak také při výstupní kontrole finálního výrobku po dokončení svařování.

Vady se dělí podle jejich polohy vzhledem ke vztahu k povrchu na:

- povrchové
- podpovrchové

Charakteristika povrchové vady je taková, že se jedná o vadu, která je spojena s povrchem materiálu. Odhalení povrchových vad je závislé především na drsnosti povrchu, způsobu zpracování povrchu svaru a v neposlední řadě na čistotě povrchu. Pro detekci těchto vad se u svarů používá těchto metod:

- vizuální zkouška
- kapilární zkouška
- zkouška metodou magnetickou práškovou

O podpovrchovou vadu se jedná pokud není vada spojena s povrchem materiálu. Jedná se o vady, které se nacházejí uvnitř materiálu. Většinou se jde o póry, bubliny, vměstky, atd. Podpovrchové vady nelze pozorovat přímo bez porušení materiálu. Pro detekci těchto vad se u svarů používá těchto metod:

- radiografická zkouška
- ultrazvuková zkouška
- zkouška metodou vířivých proudů
- zkouška akustickou emisí

Destruktivní zkoušení

Destruktivní zkoušení se používá především tam, kde je potřeba ověřit správnou technologii postupu, především pak při tvorbě WPQR. Při uplatnění destruktivních metod je porušena celistvost materiálu pro získání reprezentativních výsledků dané zkoušky.

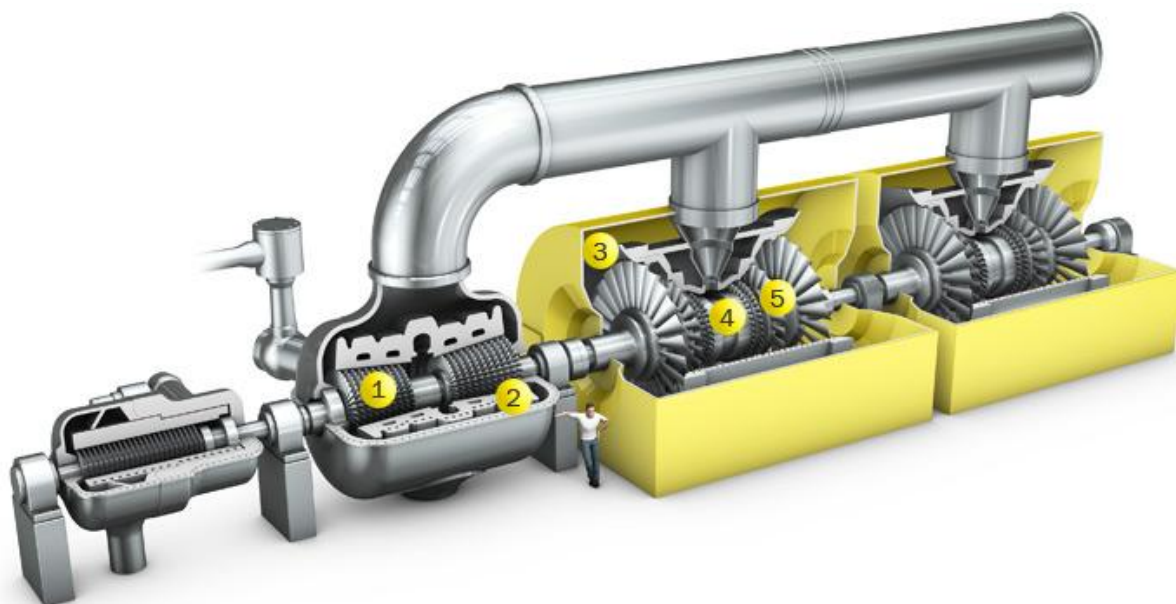
- zkouška tahem
- zkouška lámavosti
- zkouška rázem v ohybu
- zkouška rozlomením
- zkouška mikrostruktury a makrostruktury
- zkouška tvrdosti

5 TURBÍNY [2]; [6]; [12]; [26]; [31]

Turbína je rychloběžný lopatkový motor, jehož hlavním úkolem je přeměna určité energie, v energetice se jedná o energii tepelnou, na mechanickou práci. Mechanické práce turbíny se používá k pohonu různých energetických soustrojí především pak pro pohon generátoru elektrické energie.

Parní turbína pracuje na principu přeměny tepelné energie, která je získávána z páry na pohybovou energii, kterou vykonává rotor, tedy na točivý moment. Proces přeměny tepelné energie páry na mechanickou práci funguje tak, že vlivem expanze páry v rozváděcích lopatkách dojde k přeměně tlakové energie na energii kinetickou, která se mění na mechanickou práci.

Především pro vyšší výkony se používají vícestupňové turbíny. Vícestupňové turbíny pracují na principu předávání energie z jednoho stupně na druhý. Takové turbíny mohou obsahovat například vysokotlaký stupeň, středotlaký stupeň a nízkotlaký stupeň (obr. 5). Pro zvýšení efektivity se provádí dohřívání zchladlé páry mezi jednotlivými stupni, čímž se docílí zvětšení jejího objemu.



Obr. 5 Parní turbína: 1 - lopatky turbíny; 2 - skříň turbíny; 3 - skříň turbíny; 4 - hřídel turbíny; 5 - rozváděcí kolo turbíny [26]

Jednou z hlavních částí parní turbíny je rotor. Rotor přenáší svou rotací mechanickou práci na generátor, ve kterém se generuje elektrická energie.

Rozdělení rotorů podle konstrukce:

- celokovový
- svařovaný
- skládaný

U jednostupňových turbín je rotor většinou celokovový. Při použití u vícestupňových turbín se s výhodou používají svařované rotory, jelikož lze významně snížit náklady na výrobu rotoru. Úspora nákladů spočívá především v tom, že pro stupně s nižší pracovní teplotou není nutno

použít tak kvalitní materiál, jako u stupňů s vyšší pracovní teplotou a tlaky. Dalším důvodem je také to, že i kvalitní materiál, vhodný pro vysoké pracovní teploty, nemusí mít optimální vlastnosti při práci za nižších pracovních teplot. Z těchto důvodů se rotory svařují z více částí. Použitím různorodých materiálů však dochází při svařování k problémům se svařitelností materiálů. Při svařování rotorů je kladen velký důraz na to, aby výsledný svar byl co nejkvalitnější, bez vad a s minimálním ovlivněním vlastností základního materiálu.

Jelikož se jedná o svařované rotory, tak mohou být také duté, což u rotorů zhotovovaných jinými technologiemi není možné. Výsledkem je nejenom úspora materiálu, ale také nízká hmotnost a tím nižší nároky na uložení hřídele s rotorem.

6 ROTOROVÉ MATERIÁLY [11]; [15]; [18]; [19]; [20]; [22]; [29]; [34]

Jako rotorové materiály se považují žárupevné oceli, které lze použít za zvýšených pracovních teplot. Tyto materiály se používají především v energetice u parních turbín. Jsou charakteristické svou vysokou odolností proti oxidaci a korozi a zachovávají si stálost vlastností při použití za vysokých teplot. Dále lze říci, že u nich nedochází ke krystalografické přeměně a u většiny žárupevných ocelí je v současnosti obvykle obsah uhlíku pod 0,12%.

6.1 Žárupevnost

Žárupevnost závisí na zpevnění krystalické mřížky tuhého roztoku a s tím souvisejícím zamezení pohybu dislokací a zabránění difúzi. Výše uvedené mechanismy ovlivňují tyto hlediska:

- krystalická mřížka
- substituční atomy
- precipitáty

Krystalická mřížka

Prvním hlediskem ovlivňujícím zpevnění mřížky je typ mřížky tuhého roztoku. Důvodem je tvorba tzv. parciálních dislokací v gama mřížce, které mají omezenou pohyblivost v rámci mřížky. Proto jsou odolnější proti creepovému chování austenitické oceli než oceli feritické.

Substituční atomy

Druhým hlediskem ovlivňujícím zpevnění mřížky je přítomnost substitučních atomů o velkém atomovém poloměru. Tyto atomy jsou do mřížky dodávány v podobě atomů legur, kde je nejvíce jako legující prvek používán molybden. Vznikají deformace krystalické mřížky zabráňují pohybu dislokací a tím i creepovému chování. Negativní vliv na obsah molybdenu v tuhém roztoku má právě jedna z jeho vlastností, a to karbidotvornost.

Precipitáty

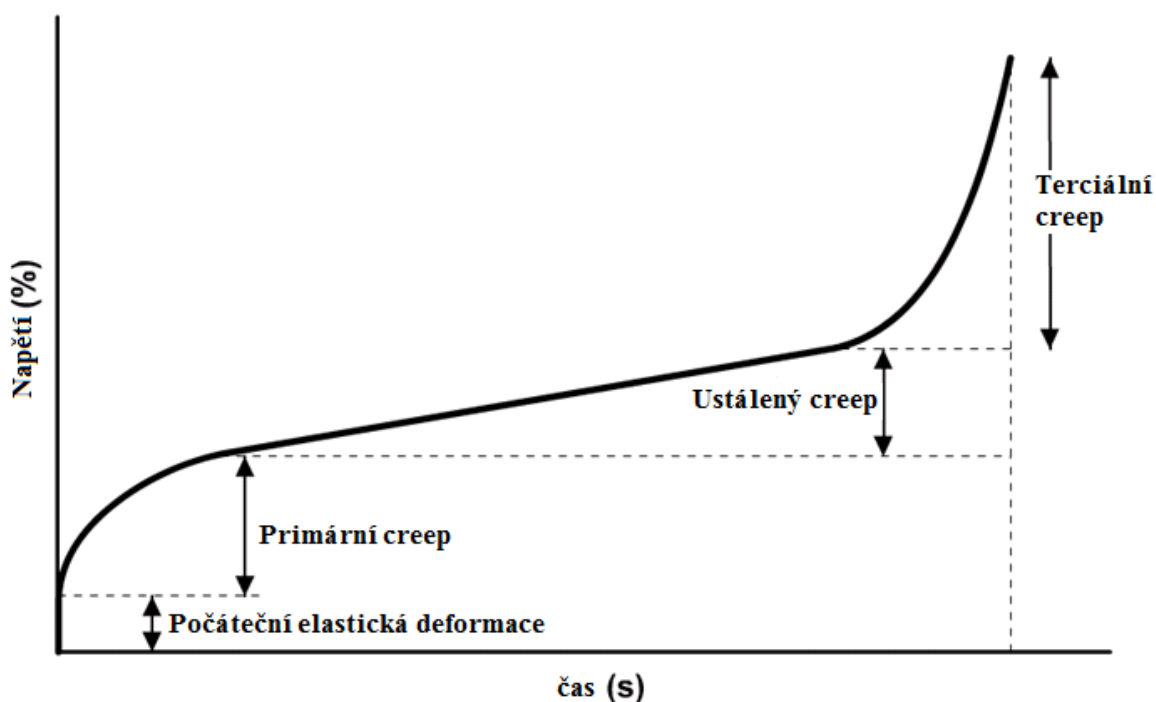
Dalším hlediskem ovlivňujícím zpevnění mřížky je výskyt částic jemného precipitátu. Tímto precipitátem mohou být sloučeniny některých legujících prvků jako jsou chrom, molybden, vanad, niob a dalších s uhlíkem či dusíkem, případně se oběma prvky. Jejich účel, zabránění pohybu dislokací, funguje na principu tzv. Orowanova mechanismu.

6.2 Creep

Jedná se o jev, ke kterému dochází, pokud je materiál trvale namáhán tahovým napětím v kombinaci s jeho pracovní činností v prostředí vysokých teplot. Tento děj se u kovů nejvíce projevuje nad homologickou teplotou, která vyšší jak 40 % teploty tavení. Při tomto jevu dochází k trvalé deformaci materiálu a mohou vznikat trhliny. Tento proces charakterizují tři stádia. V první stádiu dochází k rychlé degeneraci materiálu a rychle vznikají deformace. Ve druhém stádiu dochází k ustálení toho to procesu a nedochází k tak výrazným změnám. Ve třetím, posledním, stádiu opět začne docházet k rychlým změnám v materiálu, dokud

nedojde k porušení materiálu vlivem lomu. Nejčastějším místem, kde ke creepu dochází jsou lopatky turbín a kotlářské trubky.

O rychlosti tečení rozhodují oba vstupní parametry, jak velikost teploty, tak velikost zatížení (obr. 6). Creep probíhá ve třech fázích. V první části rychle narůstá deformace. Po překonání první fáze přechází materiál do druhé fáze, kde je ustálený (nedochází k výrazným deformacím) a v závěrečné fázi se deformace prudce zvyšuje.



Obr. 6 Průběh creepu [11]

6.3 Typy žárupevných ocelí

Při volbě žárupevných ocelí je nutno zohlednit několik faktorů, především pak pracovní teplotu. Jelikož současné metalurgické pochody umožňují zvyšovat užité vlastnosti vyráběných ocelí, je důležité zvážit také technologické vlastnosti, jako je například svařitelnost. Neboť oceli legované na vyšší hodnoty jsou nejen dražší, ale i náročnější na zpracování. Z těchto důvodů je důležité zvolit vyhovující kompromisní variantu, která je nejvhodnější pro danou aplikaci. Žárupevné oceli se dělí podle velikosti pracovních teplot, které je uvedeno v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Rozdělení žárupevných ocelí podle pracovní teploty [2].

Typ oceli	Pracovní teplota do °C
Uhlíkové oceli třídy 11 a 12	450
Nízkolegované oceli třídy 15	560
Feritické chromové oceli třídy 17	600
Austenitické chromniklové oceli	650
Vytvrditelné austenitické chromniklové oceli	750

Uhlíkové oceli třídy 11 a 12

Tyto oceli jsou charakteristické nízkým obsahem uhlíku a svou jemnozrnnou strukturou. Dezoxidace oceli se provádí buď hliníkem či titanem. Jedná se o nejlevnější žárupevné oceli, které jsou použitelné pouze do 450 °C. U ocelí na bázi niobu či vanadu dosahuje teplota jejich požití až 500 °C, kde zpevnění zajišťují karbonitridy.

Nízkolegované oceli třídy 15

Jedná se v energetickém průmyslu o nejrozšířenější oceli, kde hlavní roli hrají především chrom, molybden a vanad. Pokud je ocel legovaná na vyšší procento chromu, vznikají oceli vodíkovzdorné, ale zároveň jsou žárupevné. U těchto ocelí dochází ke zpevnění nejvíce precipitací. V menší míře zpevňují i atomy molybdenu substitučně. Za odolností při vysokých teplotách je přítomnost karbidických částic, které si zachovávají vysokou stabilitu.

Feritické chromové oceli třídy 17

U těchto ocelí dochází k vytvrzování tuhého roztoku. Prvkem, který tento jev vytvrzování zajišťuje je především molybden. Dalším pochodem, který zajišťuje vytvrzení, je vyloučení jemných precipitátů. Precipitáty, takto vyloučené, bývají většinou karbonitridy vanadu a niobu. Pro zlepšení prokalitelnosti jsou legovány oceli niklem do 1 hm. %. Díky vysokému podílu chromu u těchto ocelí je mimo prioritní žárupevnosti zajištěna také pasivace povrchu. Dalším přínosem zvýšeného obsahu chromu je opaluvzdornost, která dosahuje teplot až 650°. Tyto oceli jsou používány především tlakové systémy kotlů.

Austenitické chromniklové oceli

Tyto oceli jsou charakteristické svým sklonem k tvorbě tzv. vrstevných chyb. Vrstevné chyby zabráňují v pohybu dislokacím a tím zvyšují odolnost proti creepovému chování a tedy i žárupevnost. Díky tvorbě vrstevných chyb je nutné velké napětí pro opětné uvedení dislokací do pohybu. Z toho důvodu se jedná o oceli s největší odolností proti creepovému chování při zvýšených teplotách. Austenitické oceli jsou oproti ostatním mnohonásobně dražší, což je zapříčiněno zvýšenými obsahy chromu a niklu.

Vytvrditelné austenitické oceli

Proces při kterém vznikají vytvrditelné žárupevné oceli je následující: prvním údobím je rozpouštěcí žíhání a následné ochlazování ve vodě. Dalším údobím je vytvrzování, které probíhá při teplotách mezi 700 °C - 780 °C. Při vytvrzování dochází ke vzniku karbidů a karbonitridů s jinými prvky jako je wolfram, niob a vanad. Dále vznikají intermetalické fáze především niklu, hliníku a titanu.

7 POŽADAVKY NA MATERIÁL A SVAROVÉ SPOJE U TURBÍN [2]; [8]; [12]; [9]; [29]

U materiálu je důležité zachování jeho původních vlastností. U rotorových materiálu to představuje především pevnost, odolnost proti vysokým teplotám, co nejlepší creepová charakteristika, atd. Jednotlivé vlastnosti jsou ovlivňovány legujícími prvky, které materiály obsahují. Danou vlastnost může pozitivně ovlivňovat pouze jeden prvek, popřípadě kombinace několika prvků. Naopak někdy může při kombinaci více prvků dojít k jejich vzájemné interakci, která danou vlastnost potlačí. V některých případech může být za určitých podmínek legující stejný prvek přínosný, někdy naopak škodí. Při svařování se k vhodnému složení svarového kovu leguje pomocí přídavného materiálu.

7.1 Legury a jejich ovlivňování vlastností materiálu a vliv na svařitelnost

V níže uvedeném textu jsou uvedeny vlastnosti jednotlivých prvků, které dodávají svou přítomností v oceli.

- prospěšné prvky: uhlík, mangan, křemík, chrom, nikl, wolfram, vanad, molybden, titan, kobalt, niob, hliník.
- škodlivé prvky: vodík, dusík, síra, fosfor.

Uhlík

Uhlík podstatně ovlivňuje mechanické vlastnosti ocelí. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku roste pevnost v tahu, mez tvárnosti a tvrdost. Naopak dochází k poklesu rázové pevnosti. Uhlík zlepšuje kalitelnost. U korozivzdorných ocelí jeho zvýšená koncentrace (nad 0,03%) zvyšuje pravděpodobnost vzniku mezikrystalické koroze. Se zvyšujícím se podílem uhlíku dochází ke zhoršení svařitelnosti.

Mangan

Mangan funguje jako prvek podporující tvorbu austenitu. Výrazně zvyšuje pevnost, tvrdost a houževnatost, naopak má negativní vliv na tvárnost. Oceli obsahující vyšší procento manganu se vyznačují zvýšenou mezí pružnosti. Působí jako odkysličovadlo a je charakteristický svou vysokou afinitou k síře. Při svařování dochází ke slučování manganu se sírou a následně tento sulfid odchází do strusky. Podporuje hrubnutí zrna při překrystalizaci.

Křemík

Křemík funguje jako prvek podporující tvorbu feritu. Dále působí v oceli jako odkysličovadlo a má pozitivní vliv na pevnost a tvrdost. Oceli obsahující křemík mají vyšší mez tvárnosti a pružnosti, neboť tento prvek výrazně zlepšuje pružnost. Křemík ve spojení s chromem a molybdenem zvyšují žáruvzdornost a žarupevnost.

Chrom

Chrom funguje jako prvek podporující tvorbu feritu. Jeho přítomnost zvyšuje odolnost a tvrdost. Dále zvyšuje rázovou pevnost a zvyšuje žáruvzdornost. Chrom také zvyšuje kalitelnost a jeho oxidy tvoří ochranu oceli proti působení koroze.

Nikl

Nikl funguje jako prvek podporující tvorbu austenitu. Ze všech prvků nejlépe ovlivňuje současně zlepšení odolnosti a tvrdosti, a zároveň zajišťuje zlepšenou rázovou pevnost. Napomáhá zachování houževnatosti za nízkých teplot. Pozitivně ovlivňuje kalitelnost ocelí. Netvoří sloučeniny s uhlíkem.

Wolfram

Wolfram funguje jako prvek podporující tvorbu feritu. Je také představitelem karbidotvorného prvku. Jeho přítomnost zpomaluje růst zrn a zvyšuje kalitelnost. Mimo jiné zlepšuje žáruvzdornost a zvyšuje odolnost proti opotřebení při vysokých teplotách. Také zvyšuje pevnost.

Vanad

Vanad funguje jako prvek silně podporující tvorbu feritu. Má vysokou afinitu k uhlíku, tedy je karbidotvorný a vzniklé karbidy příznivě působí na zvýšení odolnosti proti otěru. Svou afinitou k dusíku snižuje předpoklady ke stárnutí oceli. Pozitivně ovlivňuje růst zrn a zvyšuje únavové vlastnosti. Svým obsahem zlepšuje odolnost proti přehřátí. Vanad příznivě ovlivňuje svařitelnost.

Molybden

Molybden funguje jako prvek podporující tvorbu feritu. Mnohem více zvyšuje kalitelnost oproti chromu či wolframu. Tvorbou karbidů dochází během popouštění k zvýšení tvrdosti, čímž se zvýší také odolnost oceli vůči otěru. Také značně snižuje křehkost u popouštěných ocelí. Jeho přítomnost v ocelích zvyšuje odolnost vůči korozi a pozitivně působí na svařitelnost. Molybden výrazně zlepšuje pevnost ocelí při použití za vysokých teplot. Při zvýšeném obsahu molybdenu v ocelích dochází ke snižování creepové pevnosti.

Titan

Titan funguje jako prvek podporující tvorbu feritu. Je charakteristický svou vysokou afinitou k uhlíku a svou přítomností zabraňuje mezikrystalické korozi, čímž stabilizuje uhlík. Nitridy titanu pomáhají při zjemnění zrna.

Kobalt

Kobalt funguje jako prvek podporující tvorbu austenitu. Jedná se o prvek, který netvoří sloučeniny s uhlíkem. Má vliv na teplotu tání, kterou zvyšuje a brání přehřátí ocelí při kalení. V jaderné energetice není přípustný ani jako nečistota.

Niob

Niob je silně afinní k uhlíku. Jeho přítomnost v oceli zvyšuje pevnost za tepla. Výrazně zlepšuje creepové vlastnosti.

Hliník

Hliník se používá u ocelí vzhledem ke své vysoké afinitě ke kyslíku jako odkysličovadlo. Dále je hliník charakteristický značnou afinitou k dusíku, takže funguje denitridačně a zabraňuje stárnutí. Působí proti růstu zrn austenitu, čímž negativně ovlivňuje hodnotu meze tečení.

Vodík

Vodík je prvek, který je v kovech nežádoucí. Má negativní vliv na mechanické vlastnosti. Snadno se rozpouští v oceli, čímž způsobuje vodíkovou křehkost. Původem jeho přítomnosti v oceli je vzdušná vlhkost.

Dusík

Dusík v oceli má vliv na tvárné vlastnosti, které značně snižuje. Do ocelí se přidává na zvýšení pevnosti. Působí negativně na svařitelnost.

Síra

Síra je prvek, který je v kovech nežádoucí. Způsobuje snížení soudržnosti austenitických zrn. Podporuje pravděpodobnost vzniku horkých trhlin. Příznivě ovlivňuje obrobiteľnost.

Fosfor

Fosfor působí negativně na křehkost, čímž také snižuje vrubovou houževnatost a zvyšuje sklon k lámavosti za studena.

7.2 Mechanické vlastnosti svarových spojů žárupevných ocelí

Mechanické vlastnosti svarových spojů mají zásadní vliv na funkci daného zařízení. Jelikož dochází při svařování k různým teplotním, ale i chemickým změnám, je třeba volit správný postup, parametry, ale i vhodnou kombinaci materiálů.

Základními vlastnostmi u nichž se požadují co nejoptimálnější parametry jsou:

- pevnost
- tvrdost
- vrubová houževnatost

Pevnost

Pevnost lze charakterizovat jako odolnost materiálu vůči vnějším silám způsobujícím porušení soudržnosti daného materiálu. Jedná se o jednu ze základních fyzikálních vlastností materiálů.

Pevnost v tahu se zkouší a určuje na trhacích strojích, kde je definované zkušební těleso, většinou tyčinka kruhového průřezu, které je namáháno na tah až do jeho přetržení. Během procesu tahového namáhání je zaznamenávána změna délky zkušební tělesa v závislosti na zkušební síle. Z výsledného diagramu se odečte nejvyšší hodnota zatěžující síly, která se podělí konečným průřezem tyčinky po přetržení a získá se tak mez pevnosti v tahu.

Tvrдость

Tvrдость lze charakterizovat jako odpor materiálu vůči vniku cizího tělesa. Určuje se zkouškami tvrdosti tak, že je stanovenou silou vtlačováno do materiálu zkušební těleso o definované velikosti, tvaru a materiálu. Vyhodnocení spočívá ve změření velikosti vtisku a následného odečtu tvrdosti z převodní tabulky nebo je tvrdost přímo odečtena z ukazatele tvrdoměru.

Vrubová houževnatost

Vrubovou houževnatost lze charakterizovat jako práci potřebnou k přeražení zkušební vzorku v místě vrubu. Práce je vztažena k ploše v kolmém průřezu v místě vrubu. Obecně lze říci, že se zvyšující se tvrdostí a tedy i větším množstvím martenzitu ve struktuře materiálu dochází ke snižování vrubové houževnatosti. Obdobně má negativní vliv na vrubovou houževnatost nízká teplota u materiálů vykazujících tranzitní chování.

Vrubová houževnatost se určuje na zkušební stroji zvaném Charpyho kladivo. Při zkoušce dochází k přeražení zkušební vzorku, což je tyčinka o definovaných rozměrech s uprostřed vytvořeným vrubem ve tvaru U nebo V. K přeražení se používá kyvadlového kladiva, spuštěného z určité výšky, jež mu dává určitou potenciální energii. Následným výkmitem po přeražení zkušební tyčinky lze ze stupnice odečíst rozdíl počáteční a koncové potenciální energie, který je výslednou prací vynaloženou na přeražení zkušební tyčinky.

8 HETEROGENNÍ SVAROVÝ SPOJ [9]; [14]; [16]; [18]; [25]

Heterogenní svarový spoj je spoj dvou a více různorodých materiálů. Při svařování dochází ke svařování materiálů, které se vzájemně liší v mnoha ohledech. Úkolem svarového spoje je vytvoření co nejpevnějšího spoje, při jehož svařování, dojde k co největšímu zachování původních vlastností základních materiálů.

Charakteristické vlastnosti heterogenních svarových spojů

- odlišné chemické složení
- odlišná mikrostruktura
- odlišné mechanické vlastnosti
- odlišné požadavky na tepelné zpracování po svaření
- odlišné koeficienty teplotní roztažnosti

Základní pravidla svařování heterogenních svarových spojů

Při svařování heterogenních svarů je nutno zohlednit rozdílné teploty tavení jednotlivých základních materiálů, jelikož materiály vysoce legované mají nižší teplotu tavení oproti materiálům nízkolegovaným a nelegovaným. Pakliže mezi teplotami tavení těchto materiálů bude značný rozdíl, tak může docházet u vysoce legovaných ocelí k praskání. Praskání u těchto ocelí je dáno tím, že dochází ke smršťování na straně méně legované oceli a tím vznikají v materiálu napětí, které způsobují právě praskání. Tomuto jevu lze předcházet speciálním postupem, který se nazývá polštářování. Polštářování je ve své podstatě vytvoření návaru na straně méně legované oceli. Vytvořením této návarové vrstvy se zabrání difúzi některých prvků do svarového kovu a tím se zabrání vzniku napětí a z nich plynoucích defektů.

Při provádění heterogenních svarových spojů je důležitá správná volba přídavného materiálu. U heterogenních svarových spojů se volí podle méně legované oceli. Naopak s ohledem na výše legovanou ocel se volí teplota přehřevu a teplota interpass. Po svařování následující tepelné zpracování je nutné volit s ohledem na oba svařované materiály. Při zvoleném tepelném zpracování se volí rychlost ohřevu a ochlazování podle výše legované oceli.

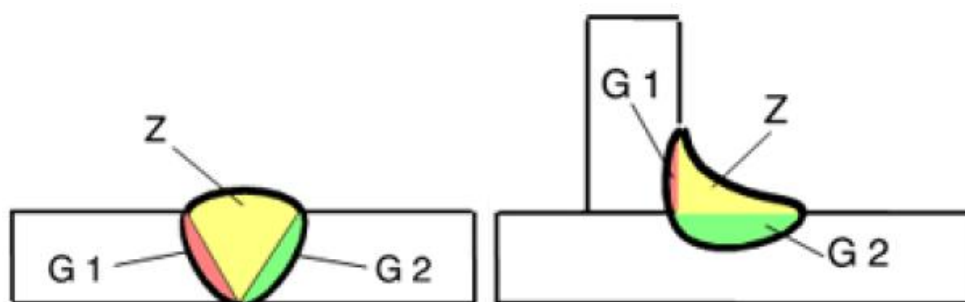
Určení chemického složení svarového kovu

Jestliže lze zjistit chemické složení obou základních materiálů a přídavného materiálu, je možné určit přibližné složení výsledného svarového kovu. Aby jej však bylo možné určit je nutné ještě znát hodnoty zředění svarového kovu ze strany obou základních materiálů. Velikost zředění se určí z makro výbrusu svarového spoje, kde se odměří velikosti jednotlivých ploch (obr. 7) a podle vztahu (8.1) se vypočte hodnota zředění.

Zředění svarového kovu lze spočítat podle vztahu (8.1).

$$V = \frac{G1 + G2}{G1 + G2 + Z} \cdot 100 \quad (8.1)$$

kde: V [%] - zředění svarového kovu,
 $G1$ [mm²] - plocha základního materiálu 1,
 $G2$ [mm²] - plocha základního materiálu 2,
 Z [mm²] - plocha návaru.



Obr. 7 Popis jednotlivých ploch výpočtového vztahu [18]

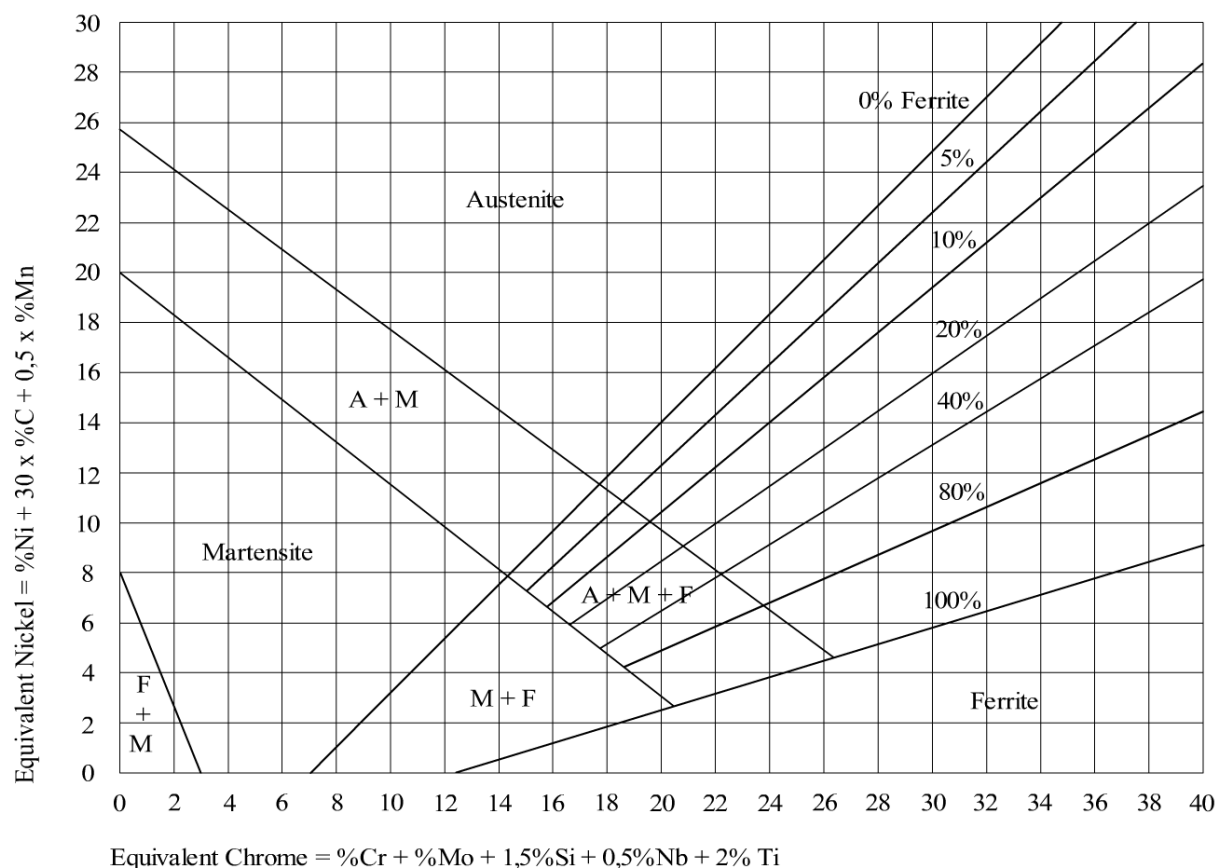
Následně lze pomocí vztahu (8.2) vypočítat podíly jednotlivých prvků ve svarovém kovu, pokud je známo chemické složení obou základních materiálů i přídatného materiálu.

Obsah vypočítaného prvku ve svarovém kovu lze spočítat podle vztahu (8.2).

$$P = V_1 \cdot P_1 + V_2 \cdot P_2 + (1 - V_{12}) \cdot P_P \quad (8.2)$$

kde: P [%] - obsah vypočítaného prvku ve svarovém kovu,
 P_1 [%] - základní materiál 1,
 P_2 [%] - základní materiál 2,
 P_P [%] - přídatný materiál,
 V_1 [%] - zředění základním materiálem 1,
 V_2 [%] - zředění základním materiálem 2,
 V_{12} [%] - zředění materiálem 1 i 2.

Pokud jsou známy podíly jednotlivých prvků ve svarovém kovu, lze pomocí Schäfflerova diagramu (obr. 8) určit výslednou strukturu svarového kovu. Ta se určí tak, že se ze známých podílů jednotlivých prvků ve svarovém kovu vypočte chromový a niklový ekvivalent a z diagramu se určí struktura. Obecně lze jednotlivé ekvivalenty charakterizovat tak, že prvky podílející se na růstu hodnot chromového ekvivalentu jsou feritotvorné a naopak prvky, jejichž zvyšováním roste niklový ekvivalent jsou austenitotvorné. Význam každého prvku u jednotlivých ekvivalentů je vyjádřen jejich poměrem významnosti.



Obr. 8 Schäfflerův diagram [9]

9 METODY SVAŘOVÁNÍ ŽÁRUPEVNÝCH MATERIÁLŮ [3]; [4]; [5]; [8]; [14]; [17]; [20]; [22]; [23]; [24]; [27]; [28]; [33]

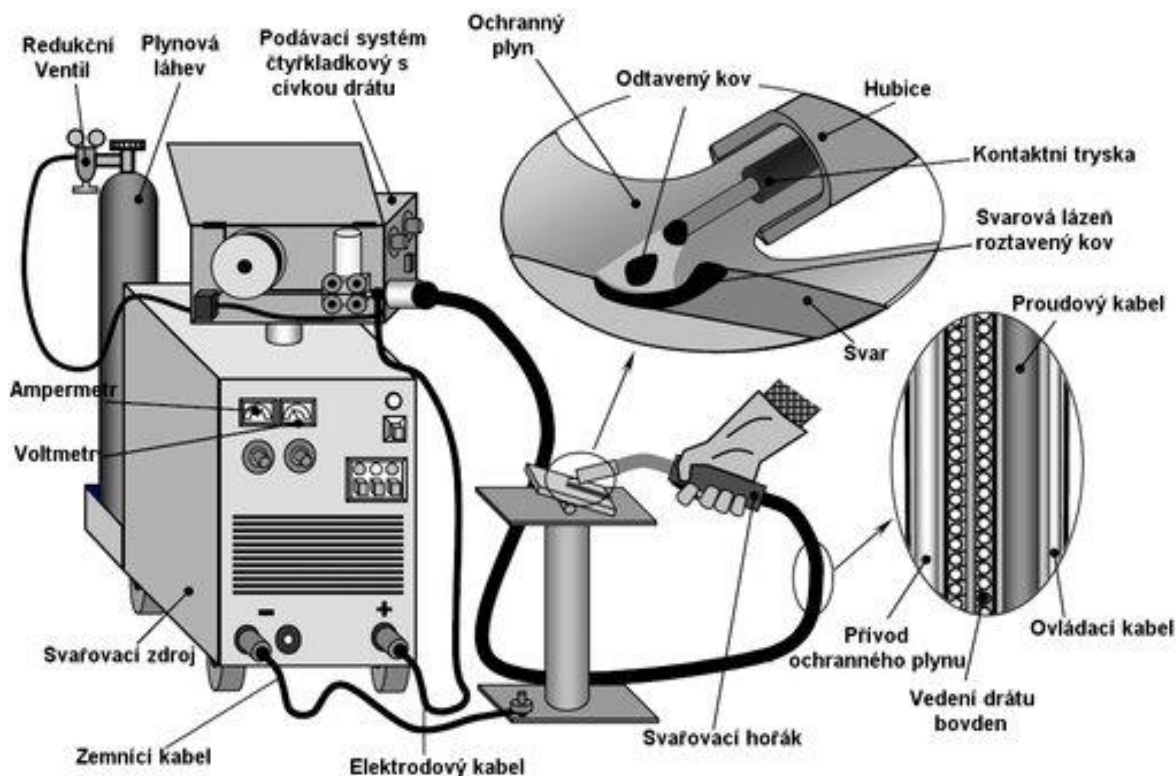
U svařování je důležitá volba správné metody svařování, jelikož každá metoda má své výhody a nevýhody. Při jejím výběru je nutno zohlednit mnoho faktorů, které ovlivňují výslednou jakost svaru, ale i jeho ekonomičnost. Mezi tyto faktory patří především náchylnost ke vzniku defektů ve svaru, dále je to velikost tepelně ovlivněné oblasti, velikost a charakteristika průvaru, sklon k vzniku deformací a tepelného napětí, a také již zmiňovaná ekonomičnost.

V energetice se pro svařování žárupevných materiálů nejčastěji používají tyto metody:

- svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře
- svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře
- svařování pod tavidlem
- plazmové svařování

Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře

Tato metoda (obr. 9) nachází největší uplatnění v průmyslu díky své produktivnosti, rychlosti i nízkým provozním nákladům. Podle použitého plynu tvořícího ochrannou atmosféru lze svařovat širokou škálu materiálů od oceli až po hliník. Metoda funguje tak, že mezi drátem a základním materiálem hoří elektrický oblouk, a drát je postupně posouván do svarové lázně, kde je odtavován. Nebezpečí nastává, pokud dojde k nesprávnému nastavení parametrů svařování. Pokud je výlet drátu vysoký a nestačí se dostatečně natavovat základní materiál, tak vznikají studené spoje.

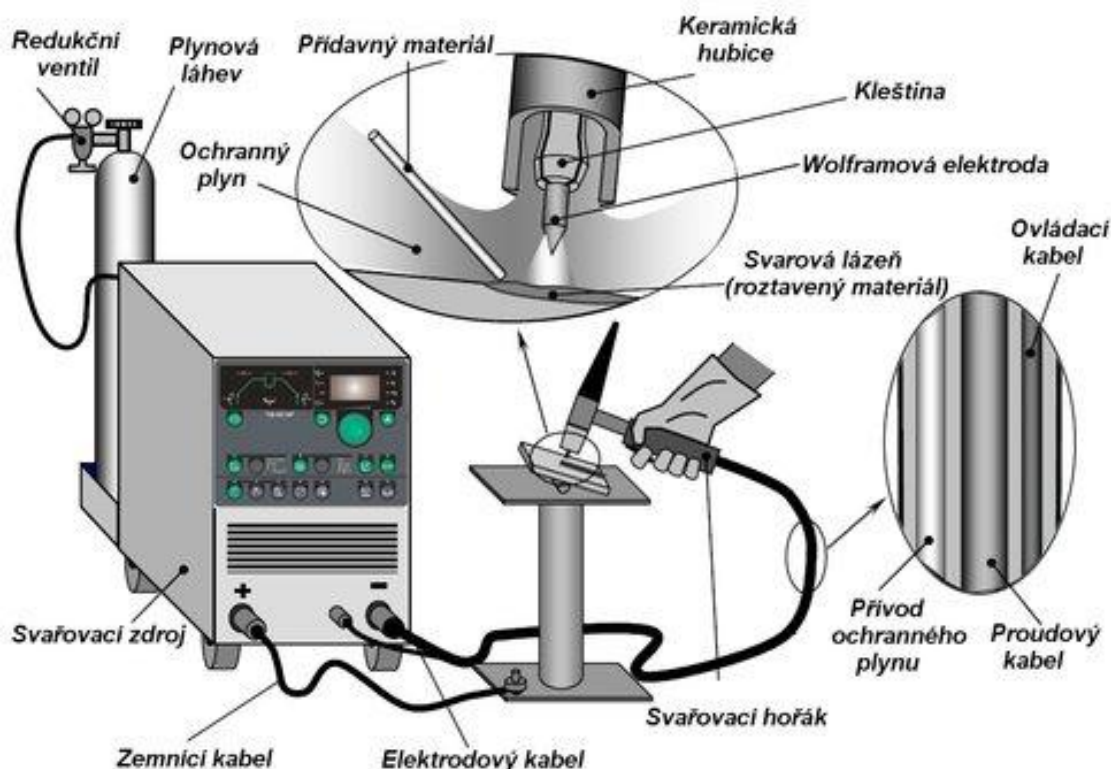


Obr. 9 Zařízení pro svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře [4]

Vzhledem tomu, že elektroda má malý průřez dochází k značnému lokálnímu prohřátí materiálu a nedostatečnému protavení. Charakteristickou vadou jsou kořenové vady. Použití této metody není vhodné tam, kde hrozí odfouknutí ochranné atmosféry tvořené některým z plynů. Následkem odfouknutí dochází k tvorbě pórů a bublin, které mají negativní vliv na jakost svaru a považují se za vady. Vzhledem k nižším nárokům na obsluhu je tato metoda dobře automatizovatelná.

Svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře

Jedná se o metodu kde elektrický oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem (obr. 10). Ochrannou atmosféru tvoří inertní plyn argon či hélium. Přídavný materiál se přidává do svarové lázně ručně nebo se svařuje bez přídavného materiálu. Je to celkem dobře automatizovatelná metoda. Materiály, které se svařují touto metodou jsou především oceli, nerez a hliník.

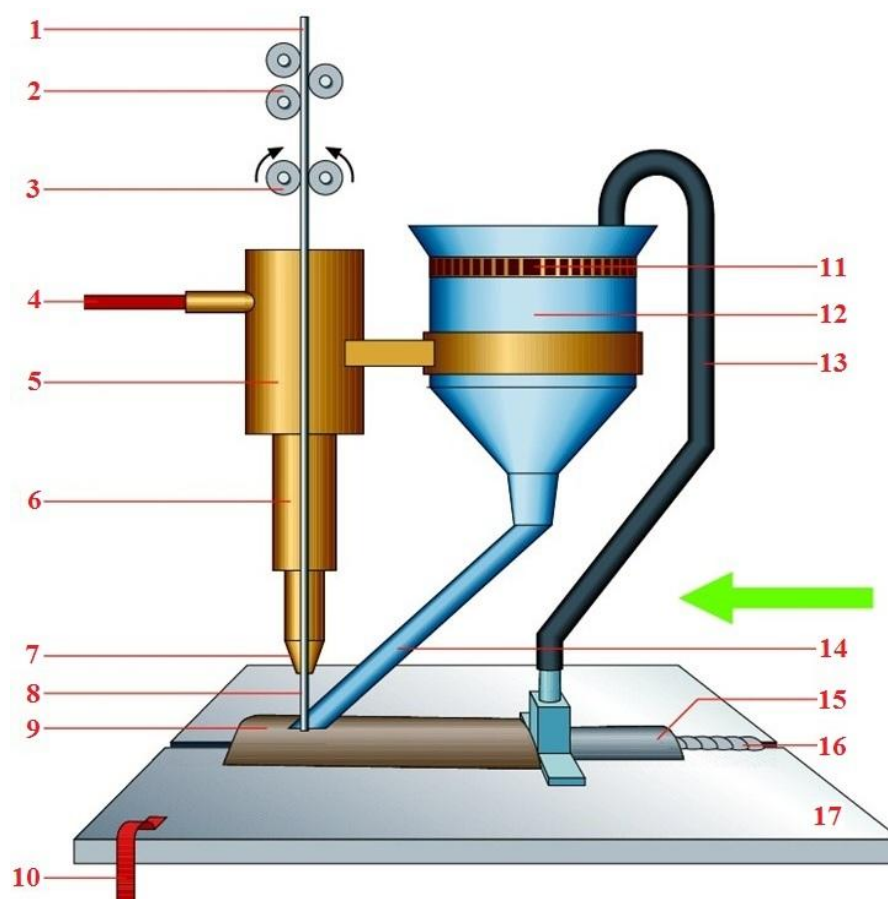


Obr. 10 Zařízení pro svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře [5]

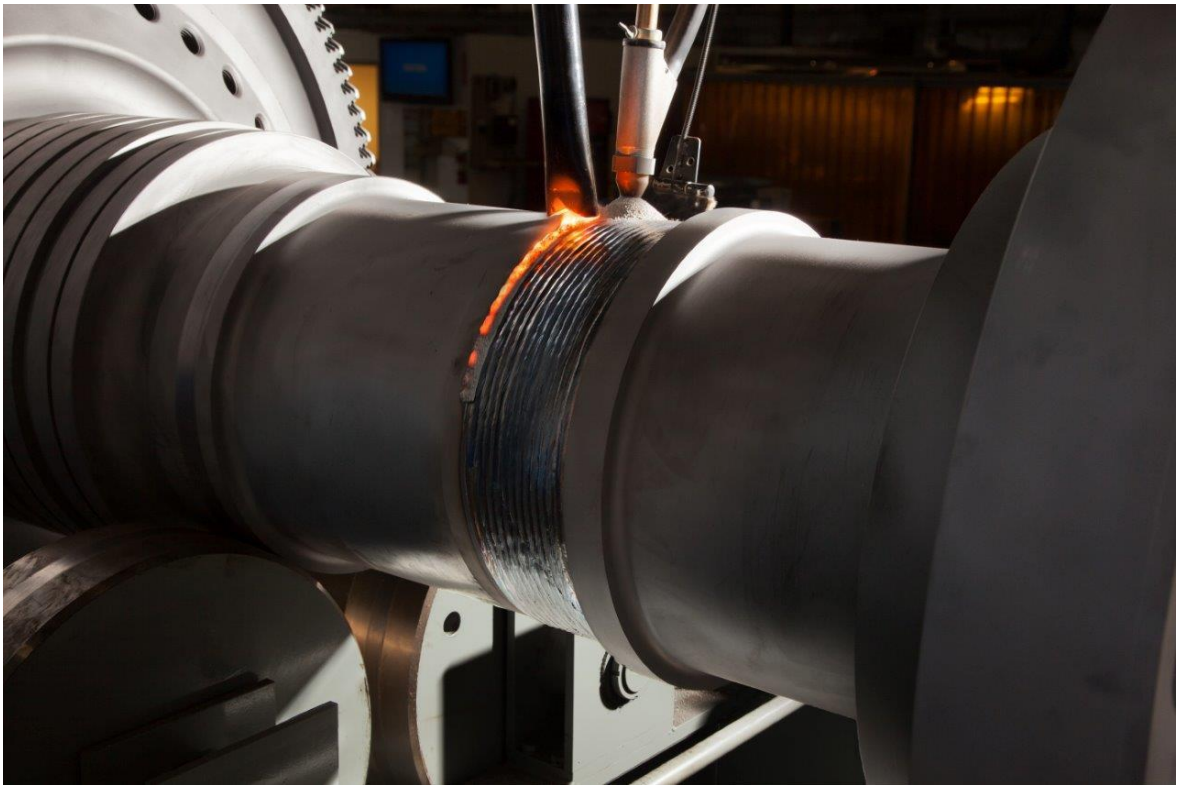
Výhodou je vysoká teplota oblouku, která je vhodná pro svařování vysoce legované oceli. Díky své charakteristice je teplotní pole při tomto svařování úzké a hluboké, což má za následek malou tepelně ovlivněnou zónu a hluboký závar. Výsledkem svařování jsou čisté a velmi kvalitní svary, které mají zásluhou specifického teplotního pole kladný vliv na deformace svaru. Další výhodou je absence strusky, díky čemuž se ve svaru nenacházejí vměstky. Nevýhodou této metody je možnost přítomnosti wolframových vměstků a wolframového rozstříku.

Svařování pod tavidlem

Při svařování touto metodou (obr. 11 a obr. 12) je do místa svaru přiváděn holý drát a hoří elektrický oblouk mezi drátem a svařovaným materiálem. Drát je pomalu přisouván a udržuje konstantní vzdálenost a velikost elektrického oblouku. Svařovat lze buď tzv. studeným drátem nebo tzv. horkým drátem. Tyto dva způsoby se liší pouze ve vzdálenosti výstupní hubice a místa svařování. Pokud jsou přisouvány zároveň dva dráty, jedná se o tzv. tandemové svařování. Místo svařování je postupně zasypáno tavidlem, které slouží k ochraně svaru před působením atmosféry a ke stabilizaci hoření elektrického oblouku, dalším přínosem tavidla je pomalejší odvod tepla z místa svařování a tím příznivější struktura svaru. V neposlední řadě podporuje rafinaci a přítomností některých prvků také leguje. Neroztavené přebytečné tavidlo je odsáváno a může být znovu použito. Jedná se o metodu, která je velmi produktivní a dobře automatizovatelná. Charakteristická je mimo jiné také vysoká jakost svarů a absence rozstříku oproti ostatním metodám. Nespornou výhodou je možnost svařování materiálů o vysokých tloušťkách. Metoda je vhodná především pro dlouhé rovné svary. Nejčastěji se svařují tupé svary, ale lze svařovat i svary koutové. Nevýhodou je, že lze svařovat pouze v poloze vodorovné s nutností ochrany kořene proti působení atmosféry. To zajistí jeho správné formování.



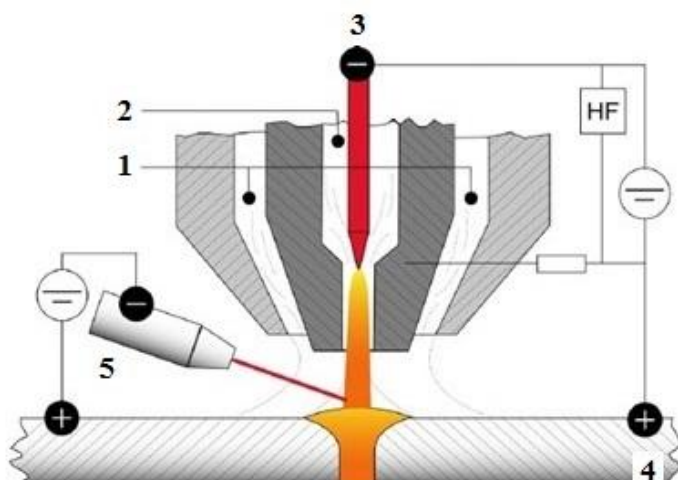
Obr. 11 Zařízení pro svařování metodou pod tavidlem: 1 - svařovací drát; 2 - rovnací válečky; 3 - podávací válečky; 4 - napájecí kabel; 5 - kontaktní trubice; 6 - prodlužovací trubice; 7 - ustalování drátu; 8 - elektroda; 9 - struska s přebytkem tavidla; 10 - zemnicí kabel; 11 - síto tavidla; 12 - násypka tavidla; 13 - odsávání přebytku tavidla; 14 - přívod tavidla; 15 - struska; 16 - svar; 17 - materiál [23]



Obr. 12 Rotor svařovaný metodou pod tavidlem [2]

Plazmové svařování

Plazmové svařování (obr. 13 a obr. 14) vzniklo vývojem svařovací metody netavící se elektrodou v ochranné atmosféře a je charakteristická vyšší produktivitou oproti metodě jejímž vývojem vznikla. Plazmové svařování pracuje na principu koncentrace tepla, kde teplota plazmy, která vystupuje z hořáku dosahuje teploty více než 10 000 °C.



Obr. 13 Princip metody plazmového svařování:
1 - ochranný plyn; 2 - plazmotvorný plyn; 3 - wolframová elektroda; 4 - základní materiál; 5 - podávací zařízení
přídavného drátu [27]



Obr. 14 Zařízení pro plazmové svařování [33]

Metoda funguje tak, že zapálením elektrického oblouku mezi wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem se prudce zvýší teplota v blízkosti elektrody. K elektrodě je přiváděn plazmotvorný plyn, který se díky vysoké teplotě začne roztahovat a dochází ke vzniku plazmy a následně dochází k urychlení výstupní rychlosti plazmy z hořáku. Místo svařování je chráněno působením ochranného plynu. U některých typů svařovacích zařízení je používán tzv. fokusační plyn, který zužuje tok plazmy. Při plazmovém svařování jsou používány plyny především na bázi argonu a hélia. Působením tepla a dynamických účinků dochází ve svarové lázni k tvorbě tzv. klíčové dírky, což je malý otvor, který se postupným posuvem opět zalévá svarovým kovem. Tento jev umožňuje svařování bez nutnosti úkosování svarových ploch i u materiálu větších tloušťek a mimo jiné tímto dochází i k úspoře přídavného materiálu. Hlavními výhodami této metody je vysoká produktivita a jakost svaru. Vlivem působení úzkého plazmového paprsku o značné koncentraci tepelné energie je menší tepelně ovlivněná oblast a tedy i vznik menších deformací.

10 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ [16]; [21]; [35]; [36]

Pro provedení experimentálního návaru byla použita ocel s označením 26NiCrMoV14-5 (dřívější značení 17 255) (tab. 10.1). Jedná se o legovanou konstrukční ocel, která je vhodná pro kalení a popouštění. Hlavní uplatnění nachází jako materiál pro výrobu rotorů turbín.

Tab. 10.1 Chemické složení oceli 26NiCrMoV14-5 [2].

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
0,27%	0,30%	0,28%	1,50%	0,35%	3,70%	0,1%

Stanovením ekvivalentu uhlíku v oceli se určí, zda lze ocel o daném chemickém složení svařovat bez předehřevu nebo je nutné materiál předehřát, aby nedošlo k jeho degradaci a zvýšení náchylnosti k tvorbě defektů. Uhlíkový ekvivalent lze určit podle vztahu (10.1).

$$Ce = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (10.1)$$

kde: Ce [%] - uhlíkový ekvivalent,

C; Mn; Cr, Mo; V; Ni; Cu [%] - procentuální zastoupení jednotlivých prvků v oceli.

$$\begin{aligned} Ce &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \\ Ce &= 0,27 + \frac{0,28}{6} + \frac{1,50 + 0,35 + 0,10}{5} + \frac{3,70 + 0,00}{15} \\ \underline{Ce} &= \underline{0,953 \%} \end{aligned} \quad (10.1)$$

Jelikož je uhlíkový ekvivalent vyšší než je hodnota 0,45 %, je nutné materiál před svařením předehřát. Výsledná teplota předehřevu je stanovena pomocí empirických výpočtových vztahů uvedených v normě ČSN EN 1011-2.

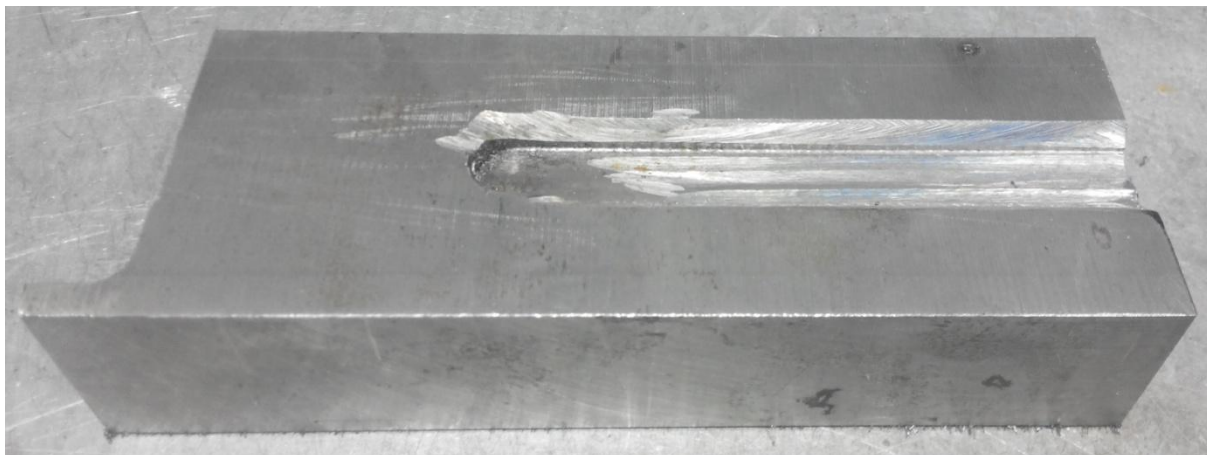
Pro zjištění vlivu předehřevu na výslednou strukturu a tvrdost materiálu bylo provedeno experimentální navaření bez předehřevu. Naměřené výsledky byly porovnány s výsledky naměřenými na zkušební vzorku ze stejného materiálu, kde byl proveden návar na předehřátý zkušební vzorek.

10.1 Návar bez předehřevu

10.1.1 Provedení navaření návaru

Experiment byl proveden na zkušební vzorku o tloušťce 30 milimetrů (obr. 15) s pomocí svařovacího zařízení pro svařování pod tavidlem (obr. 16) s parametry svařování:

- svařovací proud: 400 A
- svařovací napětí: 29 V
- rychlost posuvu: 30 m/hod

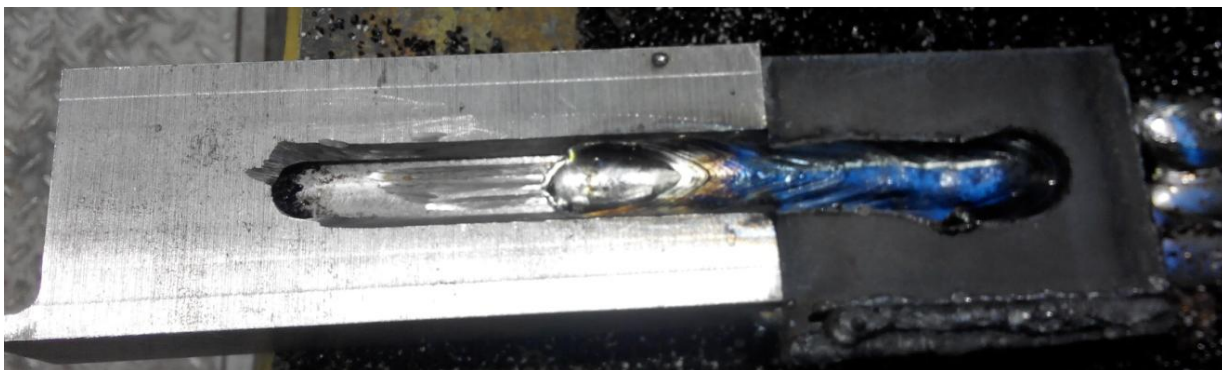


Obr. 15 Zkušební vzorek před navařením



Obr. 16 Svařovací zařízení pod tavidlem během navařování návaru

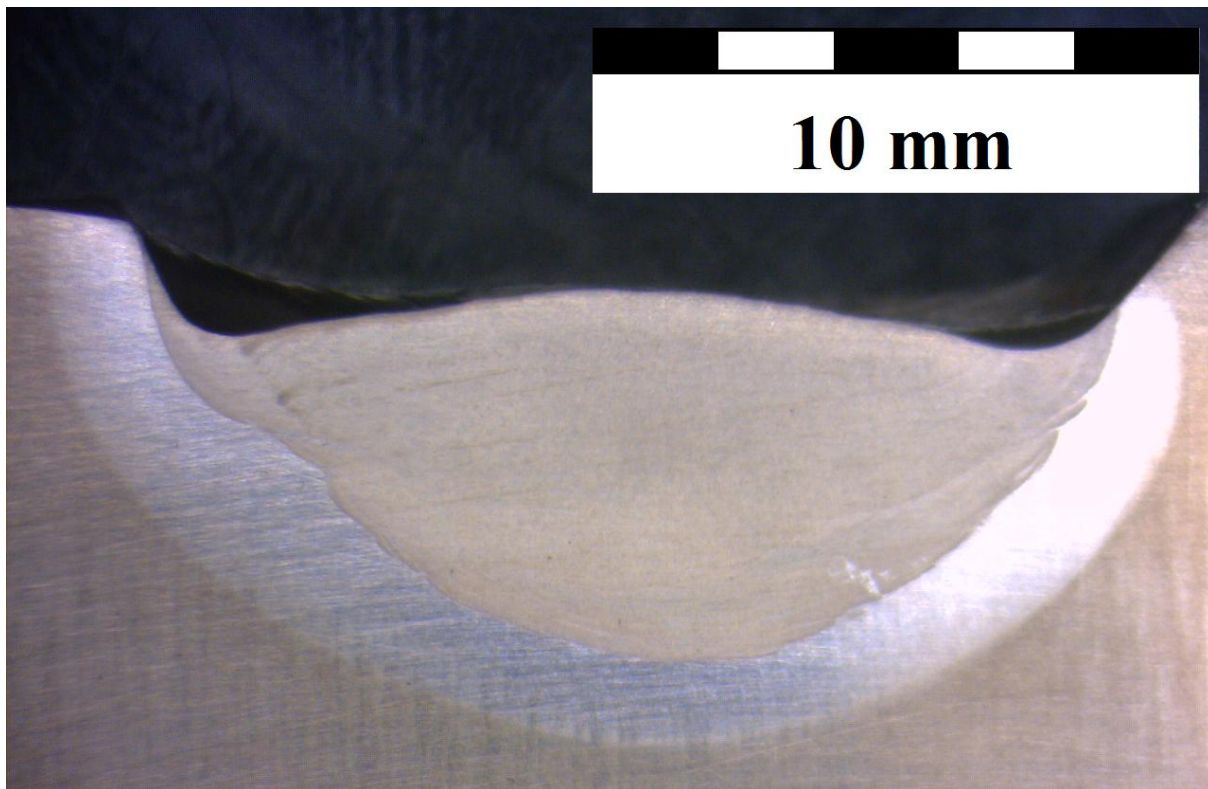
Experiment byl proveden tak, že byla ke zkušebnímu vzorku přivařena podložná destička pro vytvoření místa na rozjezd svařovacího procesu. Dále byly provedeny dva návary do předem připraveného žlábků zkušební vzorku (obr. 17). Následně bylo provedeno zpracování v metalografické dílně.



Obr. 17 Zkušební vzorek po provedení návaru

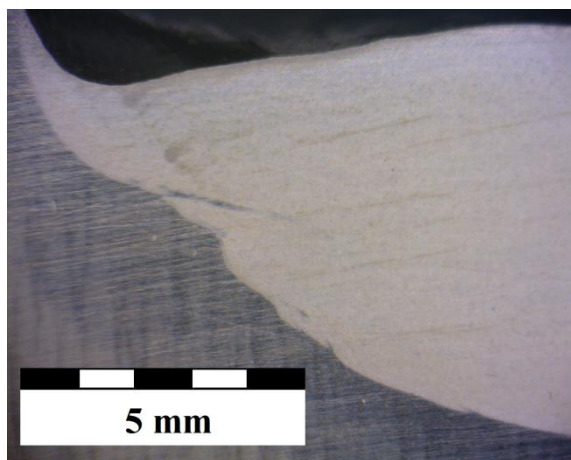
10.1.2 Makrostruktura návaru

Na níže uvedeném snímku (obr. 18) je vidět návar provedený do žlábků. Jsou patrné obě návarové vrstvy. Velikost tepelně ovlivněné oblasti je v některých místech nepravidelná. Svar nevykazuje známky pórovitosti.

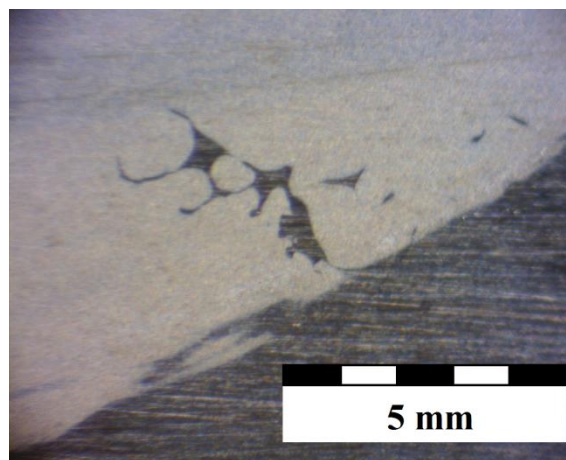


Obr. 18 Snímek makrostruktury návaru

Na obrázku 19 je patrná nespojitost mezi dvěma návarovými vrstvami. Další nespojitostí je nespécifikovaná vada na hranici tepelně ovlivněné oblasti přecházející do návaru (obr. 20). Celkově lze říci, že návar bez použití předehřevu zkušební vzorku vykazuje nízkou jakost.



Obr. 19 Necelistvost na rozhraní dvou návarových vrstev

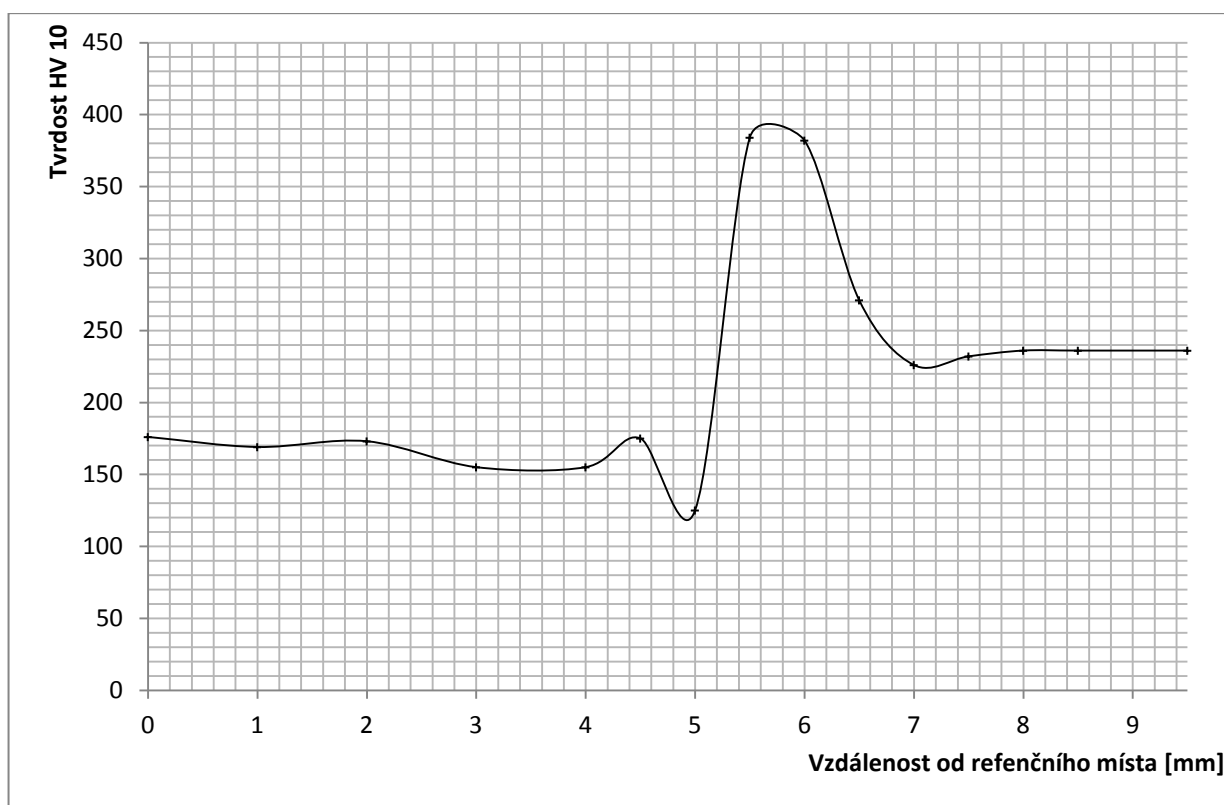


Obr.20 Necelistvost na hranici TOO

10.1.3 Průběh tvrdosti v návaru

Po provedení výbrusu preparátu byla provedena zkouška tvrdosti, která se týkala základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a samotného návaru. Jednotlivé vtisky byly prováděny po jednom milimetru. V místech, kde docházelo k velkým rozdílům v tvrdosti však byly prováděny po půl milimetru. Tvrdost se měřila ve dvou na sobě kolmých rovinách.

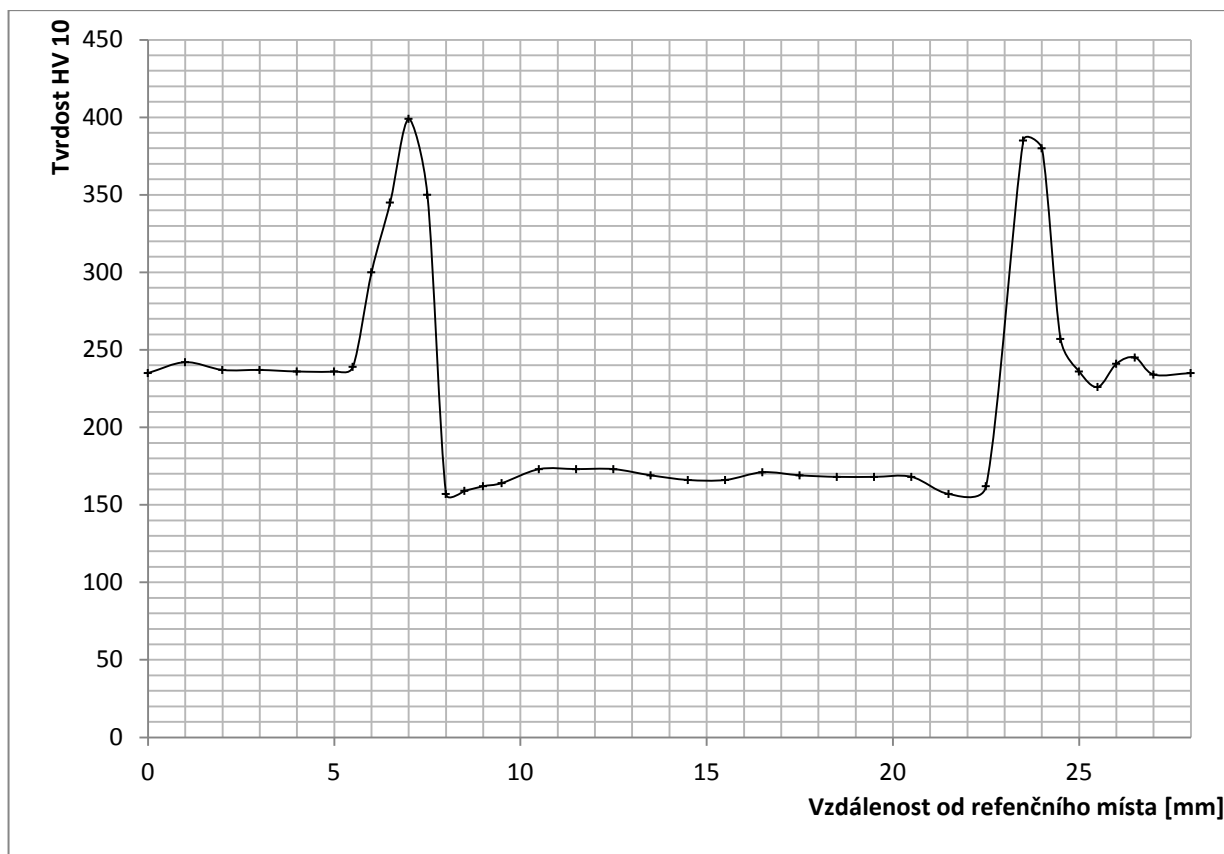
Z obou níže uvedených grafů (obr. 21 a obr. 22) je patrné, že k největším změnám tvrdosti došlo v tepelně ovlivněné oblasti, kde největší rozdíl v tvrdosti je mezi tepelně ovlivněnou oblastí a samotným návarem. Tento rozdíl je až 230 HV 10, což je více než dvojnásobek tvrdosti materiálu návaru. Dále je vidět, že tvrdost návaru je řádově o 60 HV 10 nižší, než je hodnota tvrdostí u základní, tepelně neovlivněného materiálu.



Obr. 21 Graf průběhu tvrdosti v závislosti na poloze - vertikálně

Při svařování dochází v tepelně ovlivněné oblasti, především v pásmu přehřátí, k růstu velikosti zrn. Růstem velikosti zrn je způsobeno snížení hodnot mechanických vlastností, především snížení plasticity a pevnosti. Naopak je patrný vysoký nárůst tvrdosti. Dalšími negativními vlastnostmi může být snížení odolnosti proti korozi a žárupevnosti. Velikost tepelně ovlivněné oblasti a míra degradace materiálu je závislá na velikosti tepelného příkonu a době trvání jeho působení.

Výsledná maximální hodnota tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti nepřekračuje doporučený rozsah tvrdosti ($HV = 340 - 450$), a proto by nebylo nutné materiál před svařováním přehřívát. Jelikož však dochází k častější tvorbě vad a jakost je taktéž nízká je potřeba materiál přehřát, aby bylo dosaženo co nejlepší jakosti svarového spoje.



Obr. 22 Graf průběhu tvrdosti v závislosti na poloze - horizontálně

10.1.4 Zhodnocení použité technologie svařování

Svařování pod tavidlem má z výše uvedených metod svařování rotorových materiálů nejvyšší schopnost degradace materiálu a největší tepelně ovlivněnou oblast díky vysokému vnesenému teplu. Naopak nejmenší tepelně ovlivněná oblast je u metod plazmového svařování a svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře plynu.

10.2. Návar s přehřevem

10.2.1 Stanovení teploty přehřevu

Teplota přehřevu se stanovuje pomocí empirických vzorců uvedených v normě ČSN EN 1011-2 a je závislá na více faktorech. Prvním faktorem, který zohledňuje výsledný vztah pro výpočet teploty přehřevu, je vliv chemické složení, který je vyjádřen uhlíkovým ekvivalentem (vztah 10.4). Dále je zohledněna tloušťka materiálu, který bude svařován. Teplota přehřevu se s rostoucí tloušťkou materiálu zvyšuje a naopak. Neméně důležitý je vliv obsahu difúzního vodíku, kde je požadována co nejnižší hodnota obsahu tohoto prvku ve struktuře svařovaného materiálu. V neposlední řadě má na teplotu přehřevu vliv také množství vneseného tepla do materiálu (vztah 3.1). Všechny výše uvedené faktory ovlivňující hodnotu teploty přehřevu svou sumou hodnot tvoří teplotu přehřevu a platí pro ně obecný vztah 10.2.

$$Tp = TpCET + Tpd + TpHD + TpQ \quad (10.2)$$

kde: Tp [°C] - teplota předehřevu,

$TpCET$ [°C] - vliv uhlíkového ekvivalentu na teplotu předehřevu,

Tpd [°C] - vliv tloušťky materiálu na teplotu předehřevu,

$TpHD$ [°C] - vliv obsahu difúzního vodíku na teplotu předehřevu,

TpQ [°C] - vliv množství vneseného tepla na teplotu předehřevu.

Pro danou ocel je teplota předehřevu vypočtena podle vztahu 10.3 odpovídajícímu normě ČSN EN 1011-2. Kromě výše uvedených prvků obsahuje ocel také okolo 4 mililitrů difúzního vodíku na 100 gramů oceli.

$$Tp = 697.CET + 160.tanh(d/35) + 62.HD^{0,35} + (53.CET - 32).Q - 328 \quad (10.3)$$

kde: Tp [°C] - teplota předehřevu,

CET [%] - uhlíkový ekvivalent,

d [mm] - tloušťka svařovaného materiálu,

HD [ml/100g] - obsah difúzního vodíku v materiálu,

Q [kJ.mm⁻¹] - vnesené teplo.

$$\begin{aligned} Tp &= 697.CET + 160.tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62.HD^{0,35} + (53.CET - 32).Q - 328 \\ Tp &= 697.0,501 + 160.tanh\left(\frac{30}{35}\right) + 62.4^{0,35} + (53.0,501 - 32).1,384 - 328 \\ \underline{Tp} &= \underline{225,5^\circ C} \end{aligned} \quad (10.3)$$

Stanovení vlivu chemického složení na hodnotu uhlíkového ekvivalentu spočítáno podle vztahu (10.4).

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (10.4)$$

kde: CET [%] - uhlíkový ekvivalent,

$C; Mn; Mo; Cr; Cu; Ni$ [%] - procentuální zastoupení jednotlivých prvků v oceli.

$$\begin{aligned} CET &= C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \\ CET &= 0,27 + \frac{0,28 + 0,35}{10} + \frac{1,50 + 0,00}{20} + \frac{3,70}{40} \\ \underline{CET} &= \underline{0,501 \%} \end{aligned} \quad (10.4)$$

Hodnota vneseného tepla při navařování návaru u experimentu při použití technologie svařování metodou pod tavidlem je spočten podle vztahu (3.1).

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} \cdot \eta \\
 Q &= \frac{29.400}{10^3 \cdot 8,3} \cdot 0,99 \\
 \underline{Q} &= \underline{1,384 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Teplota předehřevu pro materiál 26NiCrMoV14-5 o tloušťce 30 milimetrů je dle výpočtů z normy ČSN EN 1011-2 stanovena na hodnotu 225,5 °C.

10.3 Porovnání výsledků svařování bez předehřevu a s předehřevem

Pro porovnání bylo využito výsledků měření tvrdosti u návaru provedeném na stejném materiálu s předehřevem z bakalářské práce Svařování žárupevných ocelí metodou APT. [35]

Srovnáním výsledků průběhu tvrdosti u návaru prováděného bez předehřevu a s předehřevem je patrné, že při předehřátí materiálu došlo ke snížení tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti přibližně o 30 HV. Je patrné, že použitím předehřevu dochází k zrovnoměrnění tvrdosti ve svarovém spoji a nedochází k tak rapidnímu nárůstu tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti, jako tomu je u nepředehřívajícího materiálu.

ZÁVĚR

Byl proveden komplexní rozbor technologie svařování žárupevných rotorových materiálu, který byl zaměřen především na svařitelnost, vlastnosti žárupevných ocelí a použité technologie jejich svařování.

Pokud se svařují jednostupňové rotory, většinou se svařují ze stejného materiálu. Důvodem svařování je jejich vylehčení, kde se vykovou dvě části miskovitého tvaru, které se k sobě svaří. U těchto homogenních svarů nedochází k takovým problémům při jejich svařování jako u heterogenních svarů.

Při výrobě vícestupňových parních turbín je výhodnější svaření rotoru z více částí, kde je každý stupeň z jiného materiálu. Pro výrobu daného stupně je používán nejvhodnější materiál, který odpovídá pracovním podmínkám, především pracovní teplotě. V neposlední řadě hraje roli i cena materiálu, kde s klesající teplotou klesají i nároky na materiál a tak je i nižší cena materiálu. Pokud jsou svařovány tyto různé materiály, tak při svařování nastávají problémy díky odlišnému chování těchto materiálů při svařování a následně i při provozu. Rozdílné vlastnosti mohou způsobovat napětí v materiálu, které může vyústit až k vzniku defektů ve svarovém spoji. U heterogenních svarů dochází především k vzniku trhlin.

Výsledkem experimentální části je, že při provedení návaru na žárupevnou ocel 26NiCrMoV14-5 bez předehřevu vykazuje řádově o 30 HV vyšší tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti, než tomu tak je u stejné oceli navařované s předehřevem a z toho vyplývá, že pro zrovnoměnění tvrdosti ve všech částech svarového spoje je nutné zařadit předehřev. Stanovená teplota předehřevu materiálu je v případě této oceli při tloušťce 30 milimetrů na 225,5 °C. Mimo zvýšené tvrdosti obsahoval zkušební vzorek bez předehřevu i vady na hranici tepelně ovlivněné oblasti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [7]

1. Alstom Power: Arabelle™ steam turbines for nuclear power plants. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://www.alstom.com/power/nuclear/arabelle-steam-turbines/>
2. Alstom Power: Steam turbines for coal and oil plants. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://www.alstom.com/power/coal-oil/steam-turbines/>
3. Amazon Web Service. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://s3.amazonaws.com/cdn.hagerman.com/assets/images/Rotor+welding>
4. Automig - internetový magazín: MIG/MAG (CO₂). [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
5. Automig - internetový magazín: TIG (Tungsten Inert Gas). [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
6. BEČVÁŘ, Josef et al. *Tepelné turbíny*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 544 s.
7. Citace.com: Generátor citací. [online]. [cit. 2014-03-03].
Dostupné z: <http://generator.citace.com/>
8. DILLINGER, Josef et al. *Moderní strojírenství: pro školu a praxi*. 1. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
9. Docstoc. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://www.docstoc.com/docs/54839884/Application-of-the-Schaeffler-diagram>
10. Dr. Jonathan S. Colton. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: http://www.old.me.gatech.edu/jonathan.colton/me4210/joiningchapter_files/image022.jpgs/prod/tig_welding2_product.jpg
11. ESA - IMPRESS Education. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/Question_Mechanical_Properties_24.html
12. FIEDLER, Jan. *Parní turbíny: návrh a výpočet*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 66 s. ISBN 80-214-2777-9.
13. Greens Power Limited. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: http://www.greenspower.co.uk/images/Macro_of_Pipe_Butt_Weld.jpg
14. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: STÚ Bratislava, 2009, 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
15. HRIVŇÁK, Ivan. *Zvariteľnosť ocelí*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979, 240 s.
16. Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2001. 292s. ISBN 80-85771-85-3
17. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2001. 395s. ISBN 80-85771-81-0
18. KOLAŘÍK, Ladislav. *Hodnocení svařitelnosti*. 2010.
19. KOUSTSKÝ, Jaroslav. *Slitinové oceli pro energetické strojírenství*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 340 s.

20. KREJČA, Josef et al. *Magnetická metoda prášková stupeň I, II: podklady pro školení dle EN 473/ISO 9712, SNT-TC-1A a EN4179/NAS410*. Praha: ATG - Advanced Technology Group, 2012, 123 s.
21. Longhai steel. [online]. [cit. 2014-03-03].
Dostupné z: <http://www.upsteel.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid>
22. MAŘÁNEK, Pavel et al. *Kapilární metoda stupeň I, II: podklady pro školení dle EN 473/ISO 9712, SNT-TC-1A a EN4179/NAS410*. Praha: ATG - Advanced Technology Group, 2012, 135 s.
23. Mechanical Engineering: Submerged arc welding. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/submerged-arc-welding>
24. MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. 3. vyd. Praha: Scientia, 2007, 241 s.
ISBN 978-80-86960-28-9.
25. OCHODEK, Vladislav. *Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I*. 1. vyd. Ostrava, 2011.
26. Sandvik Coromant :Parní turbína. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/CS-CZ/INDUSTRYSOLUTIONS/CONDENSING_POWER/STEAM_TURBINES/PAGES/DEFAULT.ASPX
27. Sieco Engineers: Plasma welding. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: http://www.siecoengineers.com/images/prod/tig_welding2_product.jpg
28. Svařování plazmou. [online]. [cit. 2014-03-03].
Dostupné z: www.esab.cz/cz/cz/education/processes-paw.cfm
29. ŠENBERGER, Jaroslav et al. *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vyd. Brno: VUTIUUM, 2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
30. ŠKEŘÍK, Michal et al. *Vizuální metoda stupeň I, II: podklady pro školení dle EN 473/ISO 9712, SNT-TC-1A a EN4179/NAS410*. Praha: ATG - Advanced Technology Group, 2012, 133 s.
31. ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010, 244 s. ISBN 978-80-7043-862-6.
32. VĚCHET, Stanislav a Karel NĚMEC. *Tepelné zpracování*. 2006.
33. WeldMyWorld.com: Plasma Cutting Table Set Up Guidelin. [online]. [cit. 2014-04-24].
Dostupné z: <http://www.weldmyworld.com/blog/2012/12/plasma-cutting-table-set-up-Guidelines.html>
34. ZÁDĚRA, Antonín. *Přednášky z metalurgie oceli*. 1. vyd. Brno, 2013.
35. Zpráva číslo VUT 485/323 ÚST: Technologické a parametrické zkoušky přídavných materiálů pro 2,7Ni rotorové oceli. Brno, 2013.
35. ŽEMLOVÁ, Markéta. *Svařování žárupevných ocelí metodou APT*. Brno, 2014. 34s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
Ce	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CET	Uhlíkový ekvivalent	[%]
d	Tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
G1	Plocha základního materiálu 1	[mm ²]
G2	Plocha základního materiálu 2	[mm ²]
HD	Obsah difúzního vodíku v materiálu	[ml/100g]
I	Svařovací proud	[A]
P	Obsah prvku ve svarovém kovu	[%]
P1	Obsah prvku v základní materiálu 1	[%]
P2	Obsah prvku v základní materiálu 2	[%]
PP	Obsah prvku v přídavném materiálu	[%]
Q	Vnesené teplo	[kJ.mm ⁻¹]
Tp	Teplota předehřevu	[°C]
TpCET	Vliv uhlíkového ekvivalentu na teplotu předehřevu	[°C]
Tpd	Vliv tloušťky materiálu na teplotu předehřevu	[°C]
TpHD	Vliv difúzního vodíku na teplotu předehřevu	[°C]
TpQ	Vliv množství vneseného tepla na teplotu předehřevu	[°C]
U	Svařovací napětí	[V]
v	Rychlost svařování	[mm.s ⁻¹]
V	Zředění svarového kovu	[%]
V1	Zředění základním materiálem 1	[%]
V12	Zředění materiálem 1 i 2	[%]
V2	Zředění základním materiálem 2	[%]
Z	Plocha návaru	[mm ²]
η	Koeficient účinnosti přenosu tepla při dané technologii svařování	[-]

SEZNAM POUŽITÉ OBRAZOVÉ DOKUMENTACE A TABULEK

Obr. 1	Model parní turbíny od firmy Alstom Power [1]	8
Obr. 2	Svarový spoj [13]	9
Obr. 3	Průběh tepelného zpracování [32]	11
Obr. 4	Tepelný příkon u různých svařovacích metod [10]	13
Obr. 5	Parní turbína [26]	18
Obr. 6	Průběh creepu [11]	21
Obr. 7	Popis jednotlivých ploch výpočtového vztahu [18]	28
Obr. 8	Schäfflerův diagram [9]	29
Obr. 9	Zařízení pro svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře [4]	30
Obr. 10	Zařízení pro svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře [5]	31
Obr. 11	Zařízení pro svařování metodou pod tavidlem [23]	32
Obr. 12	Rotor svařovaný metodou pod tavidlem [2]	33
Obr. 13	Princip metody plazmového svařování [27]	33
Obr. 14	Zařízení pro plazmové svařování [33]	33
Obr. 15	Zkušební vzorek před navařením	36
Obr. 16	Svařovací zařízení pod tavidlem během navařování návaru	36
Obr. 17	Zkušební vzorek po provedení návaru	36
Obr. 18	Snímek makrostruktury návaru	37
Obr. 19	Necelistvost na rozhraní dvou návarových vrstev	37
Obr. 20	Necelistvost na hranici TOO	37
Obr. 21	Graf průběhu tvrdosti v závislosti na poloze - vertikálně.....	38
Obr. 22	Graf průběhu tvrdosti v závislosti na poloze - horizontálně	39
Tab. 6.1	Rozdělení žárovevných ocelí podle pracovní teploty [2]	21
Tab. 10.1	Chemické složení oceli 26NiCrMoV14-5 [2]	35